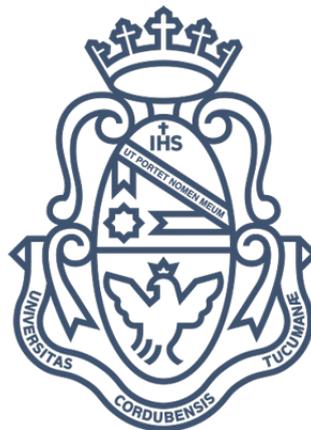


OBJETOS EXTENSOS EN EL RELEVAMIENTO VVV (VISTA VARIABLES IN THE VÍA LÁCTEA)

LAURA DANIELA BARAVALLE

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación como parte de los requerimientos para la obtención del grado de Doctor en Astronomía de la Universidad Nacional de Córdoba



Marzo 2018

Directora: Dra. María Victoria Alonso



Este trabajo está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/). Laura Daniela Baravalle: *Objetos Extensos en el Relevamiento VVV (VISTA Variables in the Vía Láctea)*, © Marzo 2018

*Nada en este mundo debe ser temido, solamente comprendido.
Ahora es el momento de comprender más, para temer menos.*

Maria Salomea Sklodowska-Curie (1867-1934).

*Dedicado a mi Papá,
con quién mire el cielo por primera vez.*

RESUMEN

El relevamiento VISTA Variable in the Vía Láctea (VVV) es un relevamiento fotométrico profundo en 5 bandas (Z, Y, J, H, K_s) que nos permite buscar fuentes extragalácticas que están oscurecidas por la presencia de nuestra Galaxia. A medida que nos acercamos a regiones de latitudes más bajas, en el plano mismo de la Galaxia, la luz de estos objetos es cada vez más débil, y son cada vez más pequeños aumentando la confusión con estrellas o asociaciones estelares de nuestra Galaxia.

El objetivo principal de este trabajo de tesis fue desarrollar un algoritmo de selección y clasificación de objetos extensos, probables fuentes extragalácticas, usando una combinación de SExtractor + PSFEx. De esta manera, se detectaron y caracterizaron estos objetos que se localizan en la región del relevamiento VVV por detrás de nuestra Galaxia. El algoritmo combina parámetros morfológicos, como el índice de estelaridad *CLASS_STAR*, el parámetro *SPREAD_MODEL* (Φ), el radio que encierra el 50% del flujo total del objeto ($R_{1/2}$) y el índice de concentración (C), con criterios fotométricos, como los colores. Los candidatos a objetos extragalácticos fueron definidos utilizando los siguientes criterios en los parámetros estructurales: $CLASS_STAR < 0.3$, $1.0 < R_{1/2} < 5.0 \text{ arcsec}$, $2.1 < C < 5$, y $\Phi > 0.002$. Para eliminar falsas detecciones, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios en los colores: $0.5 < (J-K_s) < 2.0 \text{ mag}$, $0.0 < (J-H) < 1.0 \text{ mag}$, $0.0 < (H-K_s) < 2.0 \text{ mag}$, y $(J-H) + 0.9 (H-K_s) > 0.44 \text{ mag}$. Para aquellos objetos detectados en las 5 bandas del relevamiento se deben satisfacer, además, los siguientes colores: $-0.3 < (Y-J) < 1.0 \text{ mag}$ y $-0.3 < (Z-Y) < 1.0 \text{ mag}$.

El algoritmo fue testeado y analizado en detalle en las periferias del disco galáctico en diferentes tipos de objetos: galaxias de campo, galaxias con núcleo activo y galaxias en cúmulos de galaxias. Particularmente, en los Tiles d010 y d115 se catalogaron 530 galaxias que no habían sido estudiadas anteriormente, las cuales fueron todas inspeccionadas visualmente. Estas fuentes son, en general, pequeñas, circulares, con índice de concentración cercano a 3 e índice de Sérsic (n) de 4, indicando que los objetos extragalácticos detectados son galaxias de tipo temprano. Esto se debe principalmente a la sensibilidad del infrarrojo cercano en seleccionar objetos más compactos con mayor brillo superficial.

Este procedimiento fotométrico fue aplicado al estudio las propiedades en infrarrojo cercano, utilizando los datos del relevamiento VVV, del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940. Para este blazar se obtuvieron los los siguientes parámetros fotométricos y morfológicos: $CLASS_STAR=0.99$, $\Phi=-0.0003$, $C=2.41$, $R_{1/2}=0.53 \text{ arcsec}$, $\epsilon=0.07$, $n=9.64$, magnitudes totales $Z=17.26$, $Y=16.96$, $J=15.82$, $H=16.12$ y $K_s=15.77 \text{ mag}$, y los colores $(Y-J)=0.75$, $(J-H)=0.70$, $(J-K_s)=1.04$ y $(H-K_s)=0.34 \text{ mag}$, los cuales son más característicos de objetos de tipo estelar. A partir del análisis de los diagramas Color-Magnitud y Color-Color se observa que el blazar ocupa una región particular, separándose del resto de las fuentes estelares.

Por otra parte, se aplicó el algoritmo de detección de fuentes extragalácticas al Tile d015, catalogando 933 objetos extragalácticos. En esta región se ha detectado

visualmente un candidato a cúmulo de galaxias. Esta concentración comprende 25 galaxias en un círculo de 30 minutos de diámetro. A partir del análisis fotométrico de estas galaxias se obtuvo la RS: $(J-K_s) = (-0.103 \pm 0.054) \times K_s + (2.345 \pm 0.038)$, típica relación de las galaxias tempranas pertenecientes a cúmulos de galaxias. Se aplicó además un test fotométrico adicional de agrupamiento automático a los 933 objetos extragalácticos detectados para corroborar la presencia del cúmulo de galaxias. Las fuentes extragalácticas que pertenecen a la concentración de galaxias fueron agrupadas en el grupo de menor tamaño angular de los 4 grupos encontrados.

Este algoritmo de detección y caracterización de objetos extragalácticos que se ha desarrollado se puede extender a todo el disco del relevamiento VVV, obteniéndose de esta manera la distribución de galaxias oscurecidas por la Vía Láctea. Este trabajo de Tesis ha desarrollado una metodología para detectar y caracterizar objetos extragalácticos en el relevamiento VVV, y ha mostrado el potencial del mismo. En el futuro se planea aplicar esta metodología desarrollada a las demás regiones del disco de la Galaxia, utilizando los datos del relevamiento VVV y de su extensión, el relevamiento VVVX. Estas regiones nos permitirán extender la distribución de galaxias en cúmulos de galaxias y filamentos en gran escala en estas regiones ocultas del cielo.

Palabras claves: Relevamientos. Infrarrojo. Fotometría. Parámetros Estructurales. Galaxias. Cúmulos de Galaxias.

Clasificaciones:

- 95.75.Mn Image processing
- 95.75.De Photography and photometry
- 95.85.Jq Near infrared
- 98.52.Cf Classification and classification systems
- 98.52.Eh Elliptical galaxies
- 98.54.Cm Active and peculiar galaxies and related systems
- 98.62.Qz Magnitudes and colors; luminosities
- 98.65.Cw Galaxy clusters

AGRADECIMIENTOS

Mucha gente especial me acompañó durante estos años. Vicky fue mi guía incondicional desde que decidí dedicarme a la astronomía extragaláctica, sin tener mucha idea que significaba esto. Cada paso que fuí dando fue de su mano, siempre dispuesta a enseñarme con mucha predisposición, entusiasmo, y sobre todo con mucha paciencia. Fueron días largos trabajando juntas a la par. ¡Gracias Vicky por confiar en mí!. A Nilo le tengo que agradecer cada correo que me respondió, desde el primer día, con cada duda técnica que me iba surgiendo. Además agradecer sus palabras de aliento y su gran sentido del humor. A Carlitos, que siempre estuvo con nosotros dándonos una mano. A Dante que nos facilitó el acceso a los datos del relevamiento VVV. Mil gracias a Dario, que cada vez que tuve problemas relacionados con mi compu me ayudó a resolverlos. Todo este conjunto de cosas hicieron posible llevar adelante y poder culminar mi Doctorado.

Agradezco a Lilia, Marcelo y Damián, el tribunal evaluador de mi tesis, sus comentarios ayudaron a mejorar y profundizar la versión final de este trabajo. ¡Gracias por todos sus comentarios!

A mi gran compañero de ruta, Guille, mi cable a tierra. Gracias por contenerme, cuidarme y por tanto amor. A mis Papás, mi familia de Carrilobo, que desde lejos estuvieron cerca, por la comprensión en todos estos años. A mis compañeros, amigos que me dio esta hermosa carrera con los cuales he compartido el trabajo en la oficina, mis dudas, el mate de todas las tardes, viajes y congresos. Muchos recuerdos que están siempre presentes.

Por último agradecer a la Universidad Nacional de Córdoba, especialmente a FaMAF donde me formé académicamente, y a SECyT y CONICET quienes me brindaron los fondos económicos para poder realizar y completar mi Doctorado.

ÍNDICE GENERAL

I	INTRODUCCIÓN	1
0.1	Nuestra Galaxia: La Vía Láctea	2
0.2	La región oscura detrás de La Vía Láctea	3
II	ANÁLISIS	11
1	DATOS OBSERVACIONALES: EL RELEVAMIENTO VVV	12
1.1	Telescopio VISTA	12
1.2	Relevamiento VVV (VISTA Variables in the Vía Láctea)	14
1.2.1	Fotometría producida por CASU	17
1.3	Selección de las regiones a estudiar	18
1.3.1	Tiles do10 y d115	18
1.3.2	Tile b216	19
1.3.3	Tile do15	20
2	EL PROCEDIMIENTO FOTOMÉTRICO	23
2.1	Fotometría producida por SExtractor + PSFEx	23
2.1.1	SExtractor	24
2.1.2	PSFEx	27
2.1.3	SExtractor+PSFEx	28
2.1.4	Comparación fotométrica entre SExtractor+PSFEx y CASU	30
3	BÚSQUEDA DE OBJETOS EXTRAGALÁCTICOS	36
3.1	Clasificación de Objetos	36
3.1.1	Corrección por contaminación estelar	37
3.1.2	Corrección por extinción Galáctica	43
3.2	El criterio del color	45
3.3	Resumen: Diagrama de flujo	50
4	PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y FOTOMÉTRICAS DE LOS OBJETOS EXTRAGALÁCTICOS	58
5	BLAZARES EN LA REGIÓN DEL RELEVAMIENTO VVV	65
5.1	Fuentes Fermi asociadas a blazares	65
5.1.1	Blazares en el relevamiento VVV	67
6	UN CANDIDATO A CÚMULO DE GALAXIAS EN EL RELEVAMIENTO VVV	75
6.1	Tile do15	75
6.2	Detección de cúmulos de galaxias	79
6.2.1	Análisis fotométrico del Tile do15 y el candidato a cúmulo de galaxias	79
6.2.2	La Secuencia Roja del candidato a cúmulo de galaxias VVV-J144321.0-611753.9	81
6.2.3	Test fotométrico adicional de la presencia de un cúmulo de galaxias	87
6.2.4	Análisis Espectroscópico	89
III	CONCLUSIONES	102
	Índice de figuras y tablas	107
	BIBLIOGRAFÍA	116

Parte I

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

0.1 NUESTRA GALAXIA: LA VÍA LÁCTEA

La Vía Láctea (VL), es la Galaxia donde se encuentra nuestro sistema solar junto a 200 billones más de estrellas, algunas con sistemas planetarios asociados, y cientos de cúmulos estelares y nebulosas. El nombre Vía Láctea proviene de la mitología griega y en latín significa camino de leche. Esa es, en efecto, la apariencia de la banda de luz que rodea el firmamento, y así lo afirma la mitología griega, explicando que se trata de leche derramada del pecho de la diosa Hera. Todos los objetos que forman parte de nuestra Galaxia orbitan alrededor de un centro de masa común, llamado Centro Galáctico. La Vía Láctea tiene una masa de aproximadamente $10^{12} M_{\odot}$, y su diámetro es de 30 a 35 kpc. La distancia desde el Sol hasta el centro de la galaxia es de alrededor de 8.5 kpc. La distribución de nubes de hidrógeno a través de la radio astronomía ha revelado que nuestra Galaxia es una galaxia espiral, formada por un bulbo o bulge galáctico, disco y brazos espirales (Binney, Gerhard y Spergel, 1997).

La componente del bulbo contiene, principalmente, estrellas viejas y cúmulos globulares. Tiene una forma esferoidal achatada y la dinámica de esta componente está soportada por dispersión de velocidades. También hay fuertes indicios de que en el centro galáctico, hay un gran agujero negro de unas $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$, al que se denomina Sagittarius A. Su detección fue posible a partir de la observación de un grupo de estrellas que giraban a altísimas velocidades del orden de 1.500 km s^{-1} (Nord y col., 2003).

Por otra parte, en el disco de nuestra Galaxia, se distinguen dos subestructuras: el disco fino y el disco grueso (Binney, Gerhard y Spergel, 1997). Una de las principales características del disco es la presencia de brazos espirales. Estos brazos contienen material interestelar, gas, nebulosas difusas, estrellas jóvenes y cúmulos estelares abiertos. Es en esta componente donde se exhibe gran formación estelar, ya que en los brazos existen ondas de densidad que comprimen las nubes de gas generando las perturbaciones y dando origen a la formación de estrellas. La dinámica en el disco está dominada por rotación diferencial. La Vía Láctea cuenta con dos brazos principales Centaurus y Perseus, y otros menores como Carina, Cygnus, Norma, Sagittarius y Orion, que es el brazo donde se encuentra el Sistema Solar. Los brazos se desplazan independientemente de las estrellas contenidas en la galaxia. El brillo de los brazos es mayor que el resto de las zonas, porque es allí donde se encuentran estrellas de tipo O y B, estrellas jóvenes y muy luminosas. Otros trazadores de los brazos espirales son las regiones HII, que forman nubes de hidrógeno ionizado, originadas precisamente por este tipo de estrellas.

Además, observaciones realizadas por el satélite COBE (siglas en inglés de Cosmic Background Explorer satellite, Boggess y col., 1992) dan evidencia de la estructura barrada de la Vía Láctea. El disco está unido al bulbo galáctico por una barra de 3.9 kpc de longitud (Binney, Gerhard y Spergel, 1997). Hay evidencias de que estas barras centrales también están presentes en otras galaxias espirales como:

M58, M91, M95, o M109.

Todo el sistema, bulbo y disco, está rodeado por un halo, el cual consiste en una estructura esferoidal que envuelve a la Galaxia formado por estrellas viejas (Binney, Gerhard y Spergel, 1997). En el halo se encuentran la mayor parte de los cúmulos estelares globulares. La dinámica en el halo está dominada por dispersión de velocidades, existiendo en menor medida rotación. Otra característica del halo es la presencia de gran cantidad de materia oscura, cuya existencia se dedujo a partir de la observación de una curva de rotación plana en galaxias espirales. Es posible encontrar estrellas del halo en el disco cuya procedencia se evidencia al analizar sus velocidades y trayectorias, así como su metalicidad. La masa en estrellas de esta componente es muy baja, siendo gran parte de la masa del halo galáctico en forma de materia oscura (Dehnen y Binney, 1998).

El sol, junto con su sistema planetario, está situado en las regiones más externas de la galaxia, dentro del disco y sólo unos 16.5 pc por encima del plano de simetría ecuatorial (en dirección del polo norte galáctico), aproximadamente a 8.5 kpc del centro galáctico (confirmado en 1997 por datos del satélite Hipparcos, Mitton, 1993). De esta manera, se explica la banda luminosa en el cielo, mencionada anteriormente. El sistema solar está ubicado sobre uno de los brazos espirales, llamado Brazo de Orión, el cual es la conexión entre los dos brazos más masivos, el de Sagittarius y el de Perseus.

La Vía Láctea forma parte del Grupo Local, un grupo de más de 53 galaxias, donde la mayoría de ellas son galaxias enanas (van den Bergh, 2000). Nuestra Galaxia es la segunda más grande, después de Andrómeda (M31) quizás la más masiva dentro de los miembros del grupo. M31, se encuentra aproximadamente a 778 kpc. de la Vía Láctea, es la galaxia más grande cercana, pero existen galaxias menores mucho más cercanas, denominadas galaxias satélites de la Vía Láctea y han sido recientemente descubiertas. Las principales galaxias satélites son las Nubes Mayor y Menor de Magallanes, a una distancia aproximada de 50 kpc y 61 Kpc, respectivamente de la Vía Láctea. El Grupo Local forma parte del cúmulo de Virgo. Este cúmulo es el más cercano y rico, y debido a su proximidad es uno de los cúmulos de galaxias más estudiado (Binggeli, Sandage y Tammann, 1985, Taylor y col., 2012, Sorce y col., 2016). El cúmulo de Virgo a su vez forma parte de una estructura mucho mayor llamada supercúmulo Laniakea, descubierto por Tully y col. (2014) utilizando mapas de velocidades peculiares.

0.2 LA REGIÓN OSCURA DETRÁS DE LA VÍA LÁCTEA

Nuestra ubicación en la Vía Láctea nos ha permitido estudiar, por ejemplo, la estructura espiral del disco galáctico (Genovali y col., 2014), descubrir la forma barrada del bulbo de la galaxia (Rattenbury y col., 2007) y realizar mapas dinámicos de gran resolución de las regiones de formación estelar de nuestros vecinos más cercanos, las Nubes de Magallanes (Torres-Flores y col., 2013). Sin embargo, esta ubicación privilegiada también se ha convertido en un problema cuando se trata del estudio de la estructura en gran escala del Universo, ya que la Vía Láctea es el principal obstáculo para estudiar las fuentes extragalácticas que se ubican detrás

de ella.

La presencia de polvo, gas y la gran densidad estelar oscurece una porción del cielo cerca del plano galáctico, llamada en inglés "Zone of Avoidance, ZoA" (Shapley, 1961), impidiendo la detección y estudio de las fuentes en esa línea de visión al menos en longitudes de onda del óptico (Woudt y Kraan-Korteweg, 2001). La detección y el estudio de estas fuentes son imprescindibles para poder mapear la estructura en gran escala del Universo, así como también para poder entender mejor la dinámica de nuestro grupo local (Sorice y col., 2017).

Los relevamientos de velocidades radiales permitieron estudios de velocidades peculiares de las galaxias del Universo Local para poder entender su dinámica y su masa. Los mismos mostraron la presencia de dos concentraciones masivas: el Gran Attractor, GA, centrada en $l = 320^\circ$, $b = 0^\circ$, que se encuentra por detrás de la Vía Láctea, y la región de Perseus-Pisces, $l = 95^\circ$ y $l = 165^\circ$ (Lynden-Bell y Lahav, 1988, Pantoja y col., 1997). Esto llevó a un gran interés en la década del '90 a estudiar regiones cercanas al plano galáctico para encontrar evidencias del GA. A partir de aquí inicia una extensiva búsqueda con el fin de detectar aquellas fuentes extragalácticas relacionadas con estas sobredensidades. En esta línea podemos mencionar a Renee Kraan-Korteweg liderando diferentes estudios relacionados a la búsqueda de galaxias oscurecidas por la Vía Láctea. Por ejemplo, en el trabajo de Kraan-Korteweg y Woudt (1999) se discute la importancia de tener relevamientos profundos en regiones de baja latitud galáctica en diferentes longitudes de onda: óptico, infrarrojo cercano (NIR) y radio.

El polvo galáctico atenúa la luz que proviene de las fuentes extragalácticas en longitudes de onda del óptico, pero la misma es transparente en longitudes de onda de radio, aunque en esta parte del espectro, existen limitaciones referidas a resolución y sensibilidad instrumental. En el rango óptico, estos autores definen un diámetro límite para discriminar estrellas de galaxias, aquellos objetos con un diámetro mayor a 0.2 minutos de arco eran considerados candidatos a galaxias. Usando este procedimiento, Kraan-Korteweg (2000) estudió diferentes regiones en los cúmulos de galaxias de Antlia y Hydra ($266^\circ < l < 296^\circ$ y $-10^\circ < b < 8^\circ$), en la dirección con el dipolo de radiación cósmico de microondas, encontrando más de 3279 nuevos candidatos a galaxias. En adición, Woudt y Kraan-Korteweg (2001) estudiaron las vecindades de las regiones de Crux ($289^\circ < l < 318^\circ$ y $|b| < 10^\circ$) y del Gran Attractor ($289^\circ < l < 338^\circ$ y $|b| < 10^\circ$) reportando 8182 nuevas galaxias.

Recientemente, McIntyre y col. (2015) presentaron un relevamiento en HI llamado Arecibo L-band Feed Array Zone of Avoidance (ALFA ZOA), utilizando el telescopio de radio Arecibo. En este trabajo de encontraron 61 galaxias sobre un área de 15° cuadrados centradas en $l = 192^\circ$ y $b = -2^\circ$. Sólo el 20% de las detecciones tienen asociadas mediciones en otra longitud de onda, las cuales presentan velocidades radiales mayores a $10,000 \text{ km s}^{-1}$. Ramatsoku y col. (2016) estudiaron imágenes en 21cm HI del supercúmulo de Perseus-Pisces atravesando la región del ZOA, de esta manera detectaron 211 galaxias en un área de 9.6° , el 62% de esas galaxias tienen detección en NIR, el cual es más sensible a la población estelar más vieja de la galaxia, lo cual favorece la detección de galaxias de tipo temprano; de manera opuesta a las galaxias de tipo tardío que son típicamente detectadas en relevamientos de HI. Staveley-Smith y col. (2016) presentan un relevamiento en

HI de fuentes extragalácticas en la región norte de la Galaxia ($l = 212^\circ$ a $l = 36^\circ$ y $|b| < 5^\circ$), ellos descubren una estructura compleja con tres nuevas concentraciones de galaxias en la región del GA. Por último Kraan-Korteweg y col. (2017) reportan el descubrimiento de un supercúmulo de galaxias que se extiende a través del plano galáctico en la constelación de Vela ($l = 272.5^\circ \pm 20^\circ$, $b = 0^\circ \pm 10^\circ$). En este trabajo se presentan las observaciones espectroscópicas y fotométricas de aproximadamente 4500 nuevas galaxias.

El infrarrojo cercano es una suerte de compromiso entre el rango óptico y de radio, en este rango de longitud es posible recibir la radiación a través del polvo, lo que hace posible detectar las galaxias que se encuentran detrás de la Vía Láctea. El relevamiento 2MASS (siglas en inglés de Two Micron All Sky Survey, Skrutskie y col., 2006) cubre aproximadamente el 90% del cielo en las bandas J, H, y K_s , con magnitud límite $K_s \sim 13$ mag. Este relevamiento permite, entre otros objetivos, estudios del Universo cercano excepto en regiones del cielo cercanas al plano de la Galaxia. En el disco y en el bulbo galáctico se observaron aquellas regiones con latitudes galácticas tales que $|b| > 5^\circ$ y $|b| > 8^\circ$, respectivamente. Utilizando datos del 2MASS, Jarrett y col. (2000a) presentaron un algoritmo básico para detectar, caracterizar y extraer fuentes extendidas, entre ellas las extragalácticas. Jarrett y col. (2000b) realizaron un análisis de integridad y confiabilidad para una muestra de datos 2MASS que consta de 7000 fuentes en una región de 1000 grados cuadrados de área, la cual incluye galaxias y nebulosas galácticas. Los autores presentan una muestra de galaxias más brillantes que $K_s \sim 13.5$ mag, $H \sim 14.3$ mag y $J \sim 15.0$ mag. Para la separación entre estrellas y galaxias, y poder resolver la confusión entre galaxias, nebulosas galácticas, estrellas dobles o detecciones espurias usan el plano de colores en infrarrojo ($J - H$) versus ($H - K_s$), asumiendo una buena separación entre estrellas y galaxias el color ($J - K_s$) ~ 1.0 mag. En este sentido, en el trabajo de Jarrett y col. (2000b) se confirman 14 candidatos a galaxias del 2MASS en la región del ZOA mediante observaciones espectroscópicas, en el óptico y en HI.

La Figura 1 muestra imágenes de ejemplos de fuentes extensas detectadas por 2MASS en la región del ZOA extraída del trabajo de Jarrett y col. (2000a). La imagen a color compuesta muestra las fuentes en función del flujo total integrado (de izquierda a derecha), correspondiente al rango de magnitud en la banda K_s entre 9.5 a 12.1 mag, y también en función del incremento de la densidad estelar y de polvo (de arriba hacia abajo), la latitud galáctica varía desde 20° a 0° . Como se puede observar en la Figura, para latitudes galácticas entre 10° y 20° se puede apreciar con claridad la estructura de la fuente, a medida que nos acercamos al plano de la Galaxia, es decir para valores de latitud $b < 5^\circ$, la confusión debido al polvo, y a la alta densidad estelar en estas regiones hace que sea más ardua la correcta identificación y clasificación de las fuentes, más aún cuando la magnitud del objeto es débil.

En la Figura 2 se observa una vista panorámica del cielo en infrarrojo cercano con la Vía Láctea en el centro, reflejando la distribución de galaxias detrás de nuestra Galaxia, extraída del trabajo de Jarrett (2004). La imagen fue construida utilizando datos del catálogo 2MASS XSC (siglas en inglés de Extended Source Catalog) con más de 1.5 millones de galaxias, y el catálogo de fuentes puntuales del 2MASS PSC (siglas en inglés de Point Source Catalog) con aproximadamente

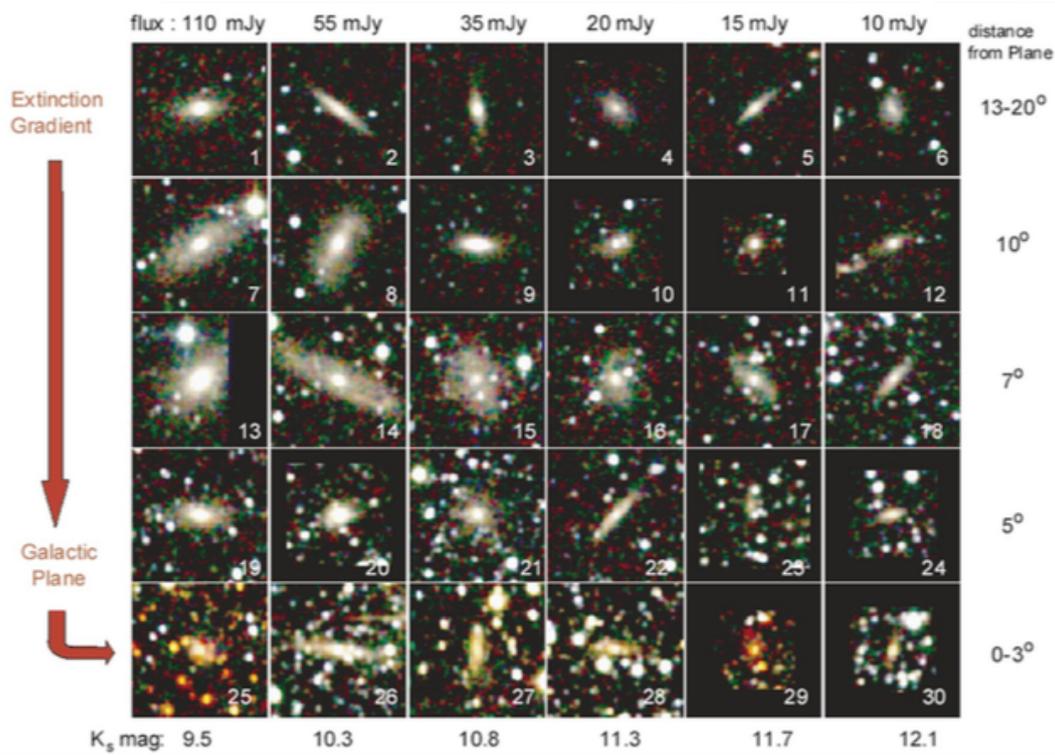


Figura 1: Ejemplos de galaxias y fuentes extensas detectadas en el relevamiento 2MASS del trabajo de Jarrett y col. (2000a). Cada imagen tiene un tamaño angular de 90 segundos de arco. En el eje de las abscisas se representan las magnitudes y en el de las ordenadas la latitud galáctica.

0.5 billones de estrellas de la Vía Láctea. Los colores en que se muestran a las galaxias están relacionados con el corrimiento al rojo o redshift (z , números entre paréntesis) obtenidos de los relevamientos espectroscópicos UGC (siglas en inglés de Uppsala General Catalogue of Galaxies, Nilson, 1995), CfA redshift survey (siglas en inglés de The Center for Astrophysics, Geller y Huchra, 1989) Tully NBGC (siglas en inglés de Nearby Galaxies Catalogue, Tully y Fisher, 1988) LCRS (siglas de Las Campanas Redshift Survey, Shectman y col., 1996) 2dF (siglas en inglés de Two degree Field Galaxy Redshift Survey, Colless y col., 2001) 6dFGS (siglas en inglés de Six degree Field Galaxy Survey, Jones y col., 2009) y SDSS (siglas en inglés de Sloan Digital Sky Survey, York y col., 2000). En azul y violeta se representan las fuentes más cercanas, $z < 0.01$; en verde las fuentes cuyas distancias que van desde $0.01 < z < 0.04$) y en rojo se representan las fuentes más distantes que puede detectar 2MASS, $0.04 < z < 0.1$. En esta imagen se identifica además la región del GA. A partir del relevamiento en velocidades radiales del 2MASS (2MRS, Huchra y col., 2012), se generó uno de los mapas más detallados del Universo Local basado en la distribución espacial de más de 43.000 galaxias del catálogo 2MASS XSC, dentro de un radio de 300 Mpc. Aquí es posible observar la presencia de estructuras masivas tales como el supercúmulo de Hércules ($z \sim 0,037$), el supercúmulo de Shapley ($z \sim 0,048$) y el supercúmulo de Perseus-Pisces ($z \sim 0,017$) y englobando toda la estructura local el supercúmulo Laniakea (Tully y col., 2014).

Otros relevamientos en infrarrojo cercano más profundos y actuales que el relevamiento 2MASS, son por ejemplo el UKIDSS (siglas en inglés de The United Kingdom Infrared Deep Sky Survey, Lawrence y col., 2007) y el VISTA (Visible

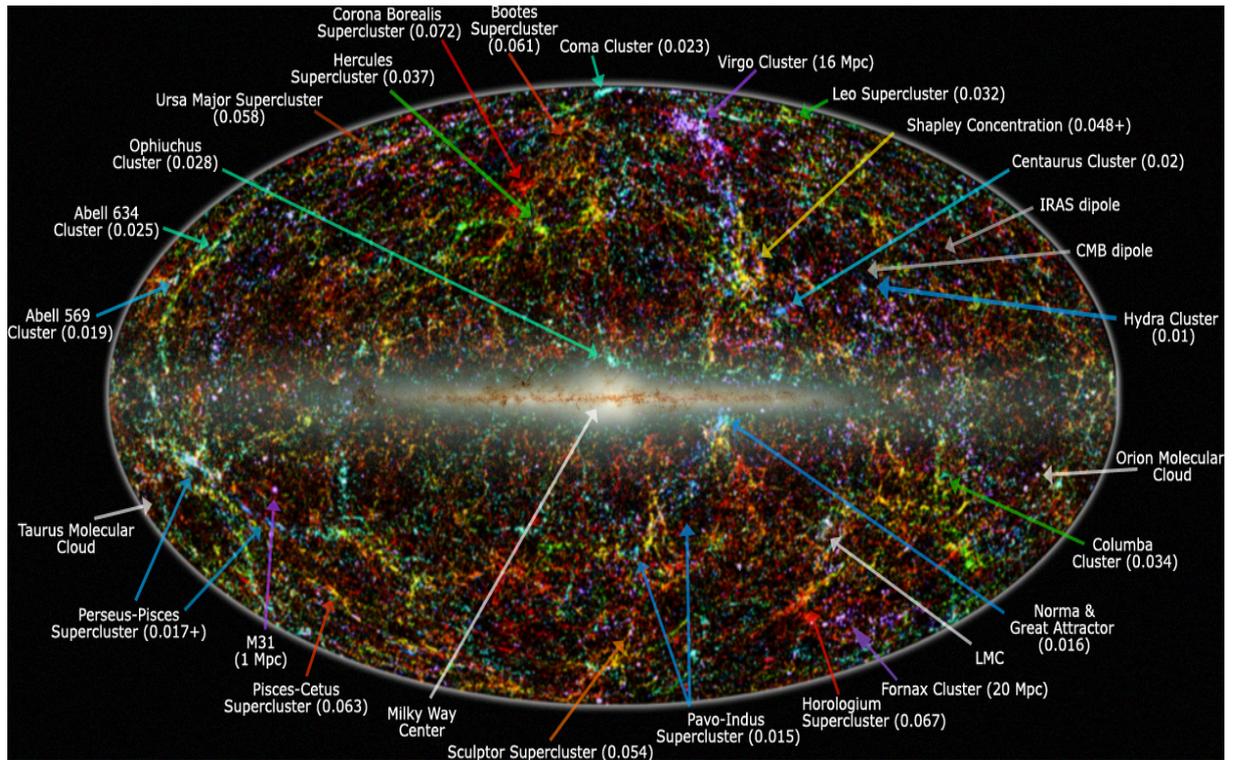


Figura 2: Vista panorámica del cielo en infrarrojo cercano extraída del trabajo de Jarrett (2004). La localización del GA se indica por la flecha azul abajo a la derecha.

and Infrared Survey Telescope for Astronomy) Kilo-degree INfrared Galaxy survey (VIKING; Arnaboldi y col., 2007) cubriendo diferentes áreas del cielo. Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014) y Said y col. (2016a,b) utilizando estos relevamientos obtienen las propiedades en infrarrojo cercano de galaxias espirales detectadas utilizando el relevamiento en HI Parkes en la región del ZOA (HIZOA, Henning, Kraan-Korteweg y Staveley-Smith, 2005). Estos trabajos están focalizados principalmente en la determinación de distancias y velocidades peculiares usando la relación de Tully-Fischer (Tully y Fisher, 1977).

VISTA Variables en la Vía Láctea (VVV, Minniti y col., 2010) es un relevamiento público en infrarrojo cercano del Observatorio Europeo Austral (ESO) que cubre el bulbo de la VL ($-10^\circ < l < 10^\circ$ y $-10^\circ < b < 5^\circ$) y una sección adyacente del plano medio de la VL ($-65^\circ < l < -10^\circ$ y $-2^\circ < b < 2^\circ$). VVV ofrece una excelente oportunidad para estudiar las fuentes extragalácticas que se encuentran detrás de la Galaxia, como lo son las galaxias de fondo, cuásares, cúmulos de galaxias y estructuras en gran escala.

Amôres y col. (2012) fueron los primeros en realizar estudios extragalácticos utilizando datos del relevamiento VVV. Identificaron, a partir de la inspección visual de imágenes combinadas en las bandas J, H, y K_s , 473 fuentes extensas en el Tile doo3 ($l = 298.356^\circ$, $b = -1.650^\circ$). Estas fuentes fueron seleccionadas a partir del análisis de su tamaño, magnitudes y colores. Debido a la alta población estelar en la región del plano de la Galaxia, la mayoría de las fuentes extensas detectadas pueden ser estrellas dobles o múltiples estrellas. Los diagramas Color-Color son de gran utilidad en el momento de discriminar galaxias de estrellas, estrellas dobles o asociaciones estelares, ya que estas fuentes son de distinta naturaleza por lo que

ocupan diferentes regiones en los diagramas Color-Color. De esta manera Amôres y col. (2012) logran identificar un total de 300 candidatos a galaxias utilizando los colores $(J - K_s)$ y $(H - K_s)$ en el VVV. En la Figura 3, a modo de ejemplo, se muestran imágenes combinadas en las bandas J, H, y K_s de 20 candidatos a galaxias reportados en este trabajo.

Por otra parte, Coldwell y col. (2014) confirmaron la detección en rayos X y dieron las propiedades fotométricas en infrarrojo cercano del cúmulo de galaxias Suzaku J1759-3450, detectado por Mori y col. (2013). El cúmulo de galaxias Suzaku J1759-3450 está ubicado detrás del bulbo de la Vía Láctea a $z = 0.13$, más precisamente en el Tile b261 del relevamiento VVV ($l = 356.597^\circ$, $b = -5.321^\circ$). Los diagramas Color-Magnitud y Color-Color de las fuentes en el campo del cúmulo de galaxias fueron utilizados para seleccionar las galaxias miembros. De esta manera, se identificaron 15 galaxias dentro de una distancia proyectada de 350 kpc desde el pico central de la emisión de rayos X, en el rango de magnitudes de $12.12 < K_s < 15.41$. A partir de una imagen combinada en las bandas J, H, y K_s se inspeccionaron visualmente las galaxias miembros, en orden de poder identificarlas a partir de características típicas como el color, tamaño y elipticidad. La Figura 4 muestra la imagen combinada del cúmulo de galaxias, en la cual las galaxias miembros se representan en recuadros rojos. Es posible observar que estas galaxias presentan una forma más extendida y color más rojo respecto al resto de las fuentes presentes en la imagen, en acuerdo con las características de las galaxias identificadas por Amôres y col. (2012) en el VVV.

Utilizando los datos fotométricos del relevamiento VVV, el principal objetivo de este trabajo es la búsqueda y caracterización automática de los objetos extragalácticos que se encuentran detrás del plano de nuestra Galaxia, y de esta manera poder contribuir a la determinación de la distribución de galaxias en el Universo Local en las regiones no estudiadas previamente por la presencia de la Vía Láctea.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: En el Capítulo 1 se describe el relevamiento VVV utilizado para realizar este trabajo de tesis y se presentan además las regiones a estudiar. El Capítulo 2 presenta el procedimiento fotométrico utilizando una combinación de SExtractor+PSFEx, luego se compara la fotometría obtenida mediante este procedimiento con la fotometría correspondiente a CASU, siglas en inglés de Cambridge Astronomical Survey Unit. En el Capítulo 3, se presentan los criterios de selección utilizados para separar, en primer lugar, fuentes puntuales de fuentes extensas, y luego el criterio de selección para definir fuentes extragalácticas. En el Capítulo 4 se muestran las principales características morfológicas y fotométricas de las fuentes extragalácticas detectadas. Luego, con el propósito de corroborar el método de clasificación propuesto a otras fuentes extragalácticas, en el Capítulo 5 se presenta el algoritmo de detección aplicado a objetos activos, y en el Capítulo 6 se presenta el análisis aplicado a otro Tile del VVV, en donde visualmente se identificó un candidato a cúmulo de galaxias. Finalmente en las conclusiones se resumen los principales resultados obtenidos, como así también las perspectivas futuras de este trabajo.



Figura 3: Imagen combinada en las bandas J, H, y K_s del VVV de 20 fuentes clasificadas como candidatos a galaxias en el trabajo de Amôres y col. (2012). Cada candidato se ubica en el centro de la imagen y es identificado con una flecha amarilla.

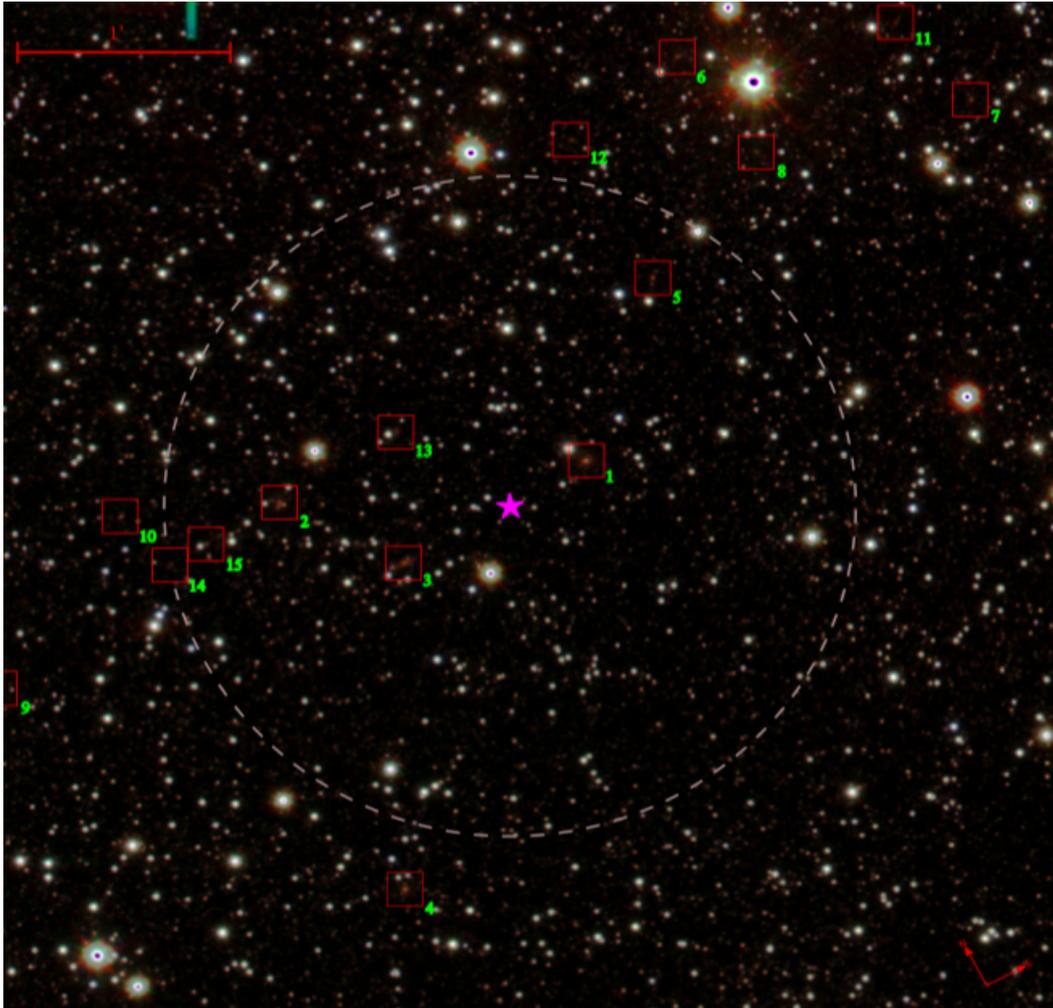


Figura 4: Imagen combinada en las bandas J, H, y K_s del VVV del cúmulo de galaxias Suzaku J1759-3450 presentado en el trabajo de Coldwell y col. (2014). En línea cortada blanca, se representa un círculo de 1.61 minutos de arco de radio centrado en el pico de emisión en rayos X y los recuadros rojos encierran a las galaxias pertenecientes al cúmulo.

Parte II
ANÁLISIS

DATOS OBSERVACIONALES: EL RELEVAMIENTO VVV

Este trabajo de Tesis se llevó a cabo utilizando datos del relevamiento VISTA Variables in the Vía Láctea (VVV, Minniti y col., 2010). En este capítulo se hará una descripción del telescopio y los instrumentos utilizados para realizar dicho relevamiento, además se detallarán las principales características y los objetivos científicos del mismo. Por otra parte se presentan las características de las regiones del relevamiento VVV elegidas para desarrollar este trabajo.

1.1 TELESCOPIO VISTA

VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, Emerson, McPherson y Sutherland, 2006) es un telescopio del Observatorio Europeo Austral (ESO) localizado en el Observatorio del Cerro Paranal en Chile que comenzó operar científicamente en diciembre del 2009. En cuanto a las características generales de VISTA, el telescopio tiene un espejo primario de 4 metros de diámetro, montura azimutal y óptica Quasi Ritchey Chrétien. La longitud focal del telescopio VISTA es de 12.1 m ($f/3.26$), su resolución angular de 0.34 segundos de arco por píxel, y el diámetro del campo de visión es de 1.65° (Dalton y col., 2006). Este instrumento fue diseñado para llevar a cabo diferentes relevamientos públicos en infrarrojo cercano, en longitudes de onda que van desde 0.9 a $2.5 \mu m$. La Figura 5 muestra una imagen de todo el cielo con la Vía Láctea en el centro mostrando todos los relevamientos realizados con VISTA. A continuación se describen brevemente cada uno de estos relevamientos destacando sus diferentes objetivos científicos.

ULTRAVISTA: Este es el relevamiento más profundo y más estrecho de VISTA cubriendo el campo de COSMOS (McCracken y col., 2010). Sus magnitudes límites alcanzan 25 mag en la banda Y, y aproximadamente 24 mag en las bandas J, H y K_s (McCracken y col., 2013). Los objetivos científicos de UltraVISTA incluyen el estudio de las primeras galaxias, la acumulación de masa estelar durante la época pico de la actividad de formación estelar y la formación de estrellas oscuras por el polvo.

VIKING (VISTA KILO-DEGREE INFRARED GALAXY SURVEY): Este relevamiento cubre 1500° cuadrados en dos regiones del cielo, los datos en infrarrojo cercano de este relevamiento permiten el estudio de galaxias en el rango de redshift de $0.7 < z < 2$, la detección de cuásares, el análisis de grupos y cúmulos de galaxias (Edge y col., 2013).

VMC (VISTA MAGELLANIC SURVEY): Es un relevamiento de 184° cuadrados que cubre las galaxias vecinas a la Vía Láctea: la Gran Nube de Magallanes y la Pequeña Nube de Magallanes en los colores (Y - J), (J - K_s) y (Y - K_s) en infrarrojo cercano (Cioni y col., 2011). Las observaciones en diferentes épocas permiten el estudio de estrellas variables, como también estudiar sus poblaciones estelares y la historia de formación estelar del sistema.

VHS (VISTA HEMISPHERE SURVEY): VHS cubre todo el hemisferio sur del cielo, con la excepción de las áreas ya cubiertas por VIKING y VVV, en dos bandas

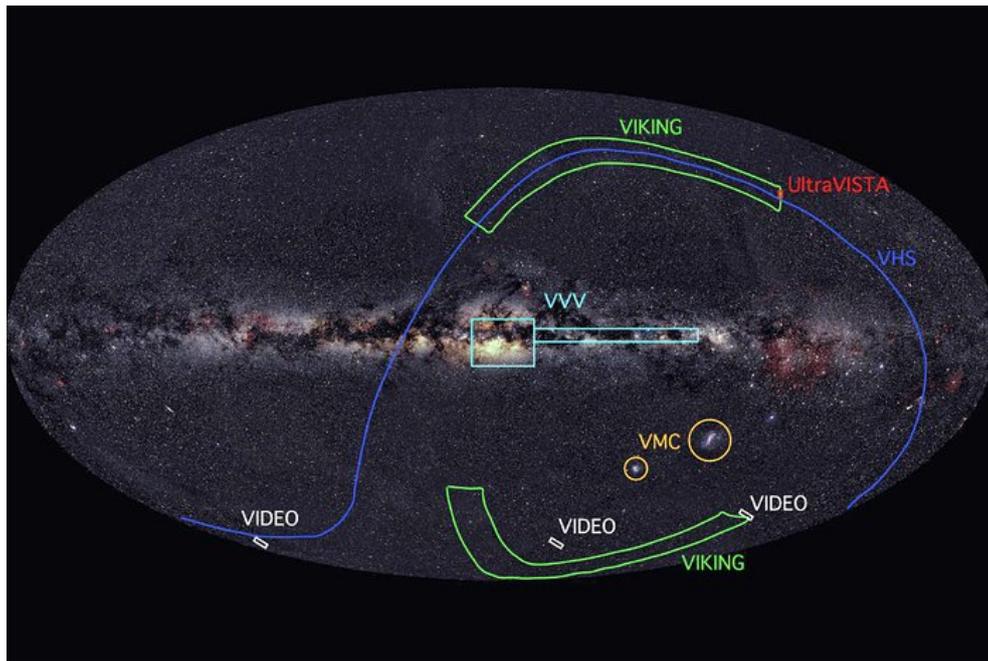


Figura 5: Representación esquemática de los diversos relevamientos llevados a cabo con el telescopio VISTA. La imagen es una proyección del cielo entero con la Vía Láctea a través del centro.

del infrarrojo cercano (J y K_s). Las magnitudes límites obtenidas para fuentes puntuales en VHS son: $J = 20.2$ mag y $K_s = 18.1$ mag, esto es aproximadamente 4 magnitudes más profundo que el relevamiento 2MASS en las mismas bandas (Skrutskie y col., 2006). Dentro de los principales objetivos de VHS se encuentra estudiar estrellas cercanas de baja masa, estudiar la historia de la fusión de nuestra Vía Láctea, medir las propiedades de la energía oscura a través de la estructura a gran escala y buscar cuásares a altos redshift ($z > 7$) (McMahon y col., 2013).

VIDEO (VISTA DEEP EXTRAGALACTIC OBSERVATIONS SURVEY): VIDEO es un relevamiento que cubre aproximadamente 15° cuadrados en infrarrojo cercano en las bandas Z, Y, J, H y K_s . Sus magnitudes límites son: $Z = 25.7$ mag, $Y = 24.5$ mag, $J = 24.4$ mag, $H = 24.1$ mag y $K_s = 23.8$ mag. El principal objetivo científico de VIDEO es estudiar la evolución de las galaxias, galaxias con núcleos activos, grupos y cúmulos de galaxias, como también analizar las estructuras del Universo desde el presente hasta $z = 4$ (Jarvis y col., 2013).

VV (VARIABLES VISTA IN THE VÍA LÁCTEA): El relevamiento VV está dirigido a estudiar las partes centrales de nuestra Galaxia en cinco bandas en infrarrojo cercano (Minniti y col., 2010). El área total de este relevamiento es de 520° cuadrados, la cual contiene más de 355 cúmulos estelares abiertos y 33 globulares. El VV es un relevamiento multi-época, con el objetivo de detectar un gran número de objetos variables y poder proporcionar más de 100 observaciones cuidadosamente espaciadas en diferentes momentos para cada parte del cielo cubierto. El catálogo final tiene cerca de mil millones de fuentes puntuales, incluyendo alrededor de un millón de objetos variables.

Tabla 1: Características fotométricas del relevamiento VVV.

	Z [mag]	Y [mag]	J [mag]	H [mag]	K _s [mag]
λ (μm)	0.88	1.02	1.25	1.65	2.15
FWHM	0.12	0.10	0.18	0.30	0.30
Magnitud límite	21.3	20.7	20.2	19.3	18.2
Brillo de cielo	18.2	17.2	16.06	14.1	13.0

1.2 RELEVAMIENTO VVV (VISTA VARIABLES IN THE VÍA LÁCTEA)

Dentro de los principales objetivos del relevamiento VVV (Minniti y col., 2010) se encuentran: obtener un mapa tridimensional de la Vía Láctea, estudiar la variabilidad de sus estrellas y poder estudiar cientos de cúmulos estelares que no fueron observados antes.

Para generar este relevamiento, el telescopio VISTA fue equipado con una cámara en infrarrojo cercano: VIRCAM (the Vista InfraRed CAMera, Dalton y col., 2006). VIRCAM está formada por 16 detectores con una escala de 0.34 segundos de arco por píxel. Se dispone de 5 filtros de banda ancha en Z, Y, J, H, K_s y un filtro de banda estrecha a 1.18 μm . En la Tabla 1 se presentan los valores característicos fotométricos del relevamiento VVV como: la FWHM (del inglés Full-Width Half-Maximum) que es el ancho a media altura que presenta un determinado pico de emisión; las magnitudes límites y el brillo de cielo característico para cada uno de los filtros Z, Y, J, H y K_s de VIRCAM. La Figura 6 presenta las curvas de transmisión para los cinco filtros, en comparación con los perfiles típicos de transmisión atmosférica para una masa de aire de 1.0 y 1.0 mm de vapor de agua en la atmósfera (Saito y col., 2012). La longitud de onda efectiva para cada uno de los filtros están listadas en la Tabla 1.

Los 16 detectores están distribuidos en la cámara en un arreglo de 4×4 . Cada exposición individual produce una imagen conocida como "pawprint", cubriendo un área de 0.599° cuadrados en el cielo. En cada una de estas observaciones se va moviendo el telescopio en ascensión recta y declinación, con el objetivo de formar una imagen o "pawprint". La Figura 7 muestra a modo de ejemplo, el movimiento del telescopio y en la Tabla 2 se detalla el valor de cada uno de los movimientos de la Figura. Finalmente, a partir de la combinación de 6 imágenes individuales o "pawprint", queda un área uniforme cubierta en el cielo de 1.50 grados cuadrados ($1^\circ \times 1.5^\circ$) a la que se denomina "Tile". La Figura 8 muestra, de manera más general, como se generan los Tiles a partir de la combinación de los diferentes pawprint.

De esta manera 348 Tiles cubren toda el área del relevamiento VVV, de los cuales 196 cubren la región del bulbo y 152 una parte del disco de la Vía Láctea. La Figura 9 muestra el área del cobertura en coordenadas galácticas, indicando los nombres de los diferentes Tiles. La letra *b* delante del número de identificación indica que el Tile pertenece a la región del bulbo, y la letra *d* que pertenece a la región disco de la Galaxia. El área del bulbo abarca 300° cuadrados en la región $-10^\circ \leq l \leq 10^\circ$ y $-10^\circ \leq b \leq 5^\circ$; y el disco cubre 220° cuadrados en la región $295^\circ \leq l \leq 350^\circ$ y $-20^\circ \leq b \leq 2^\circ$. En su totalidad el relevamiento VVV cubre 520° cuadrados en el cielo.

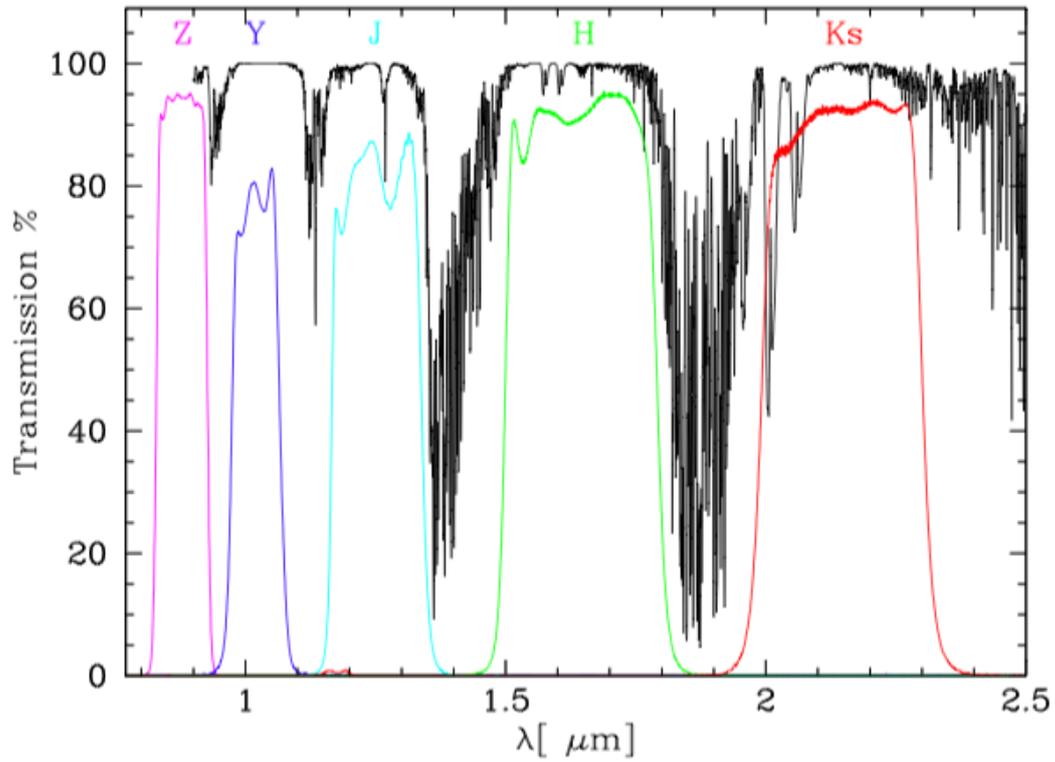


Figura 6: Curvas de transmisión para los cinco filtros Z, Y, J, H y K_s de la cámara VIRCAM, en comparación con los perfiles típicos de transmisión atmosférica para una masa de aire de 1.0 y 1.0 mm de vapor de agua, extraídas de Saito y col. (2012).

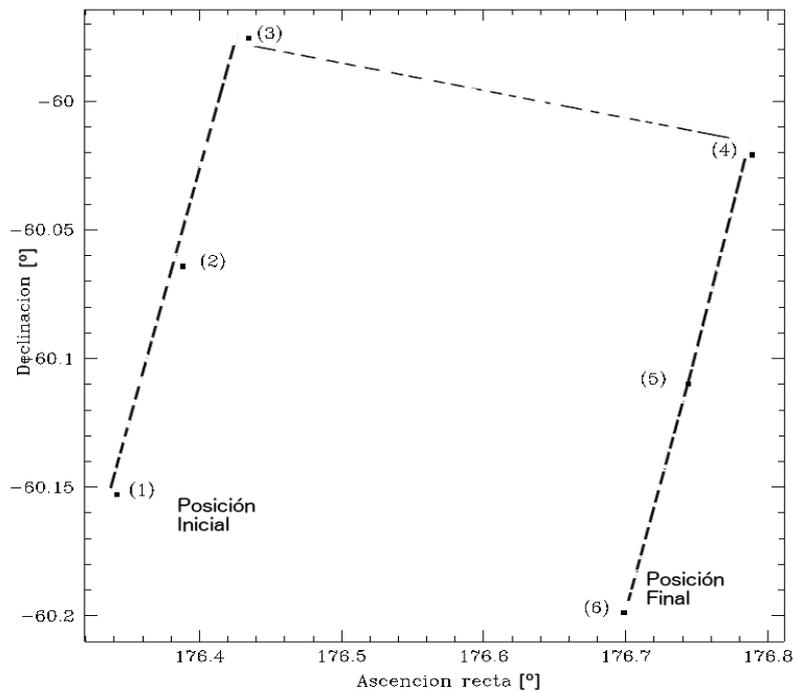


Figura 7: Esquema del movimiento en ascensión recta (horas) y declinación (grados) del campo de visión del telescopio para generar un Tile.

Tabla 2: Movimiento en ascensión recta y declinación del campo de visión del telescopio para formar un Tile.

	$\Delta\alpha$ [h]	$\Delta\delta$ [°]
(1)-(2)	-0,0465417	-0,0888057
(2)-(3)	-0,0465833	-0,0886109
(3)-(4)	-0,3545417	0,0452769
(4)-(5)	-0,0454167	0,0890008
(5)-(6)	0,045125	0,08891675

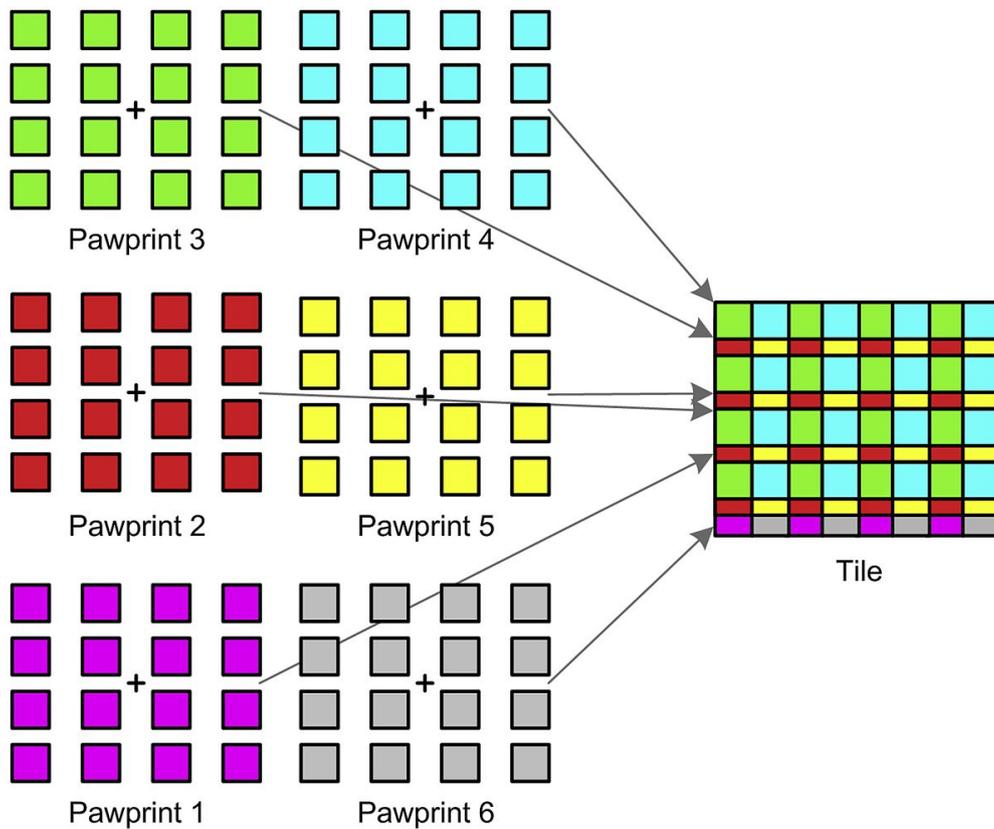


Figura 8: Esquema general de la construcción de un Tile.

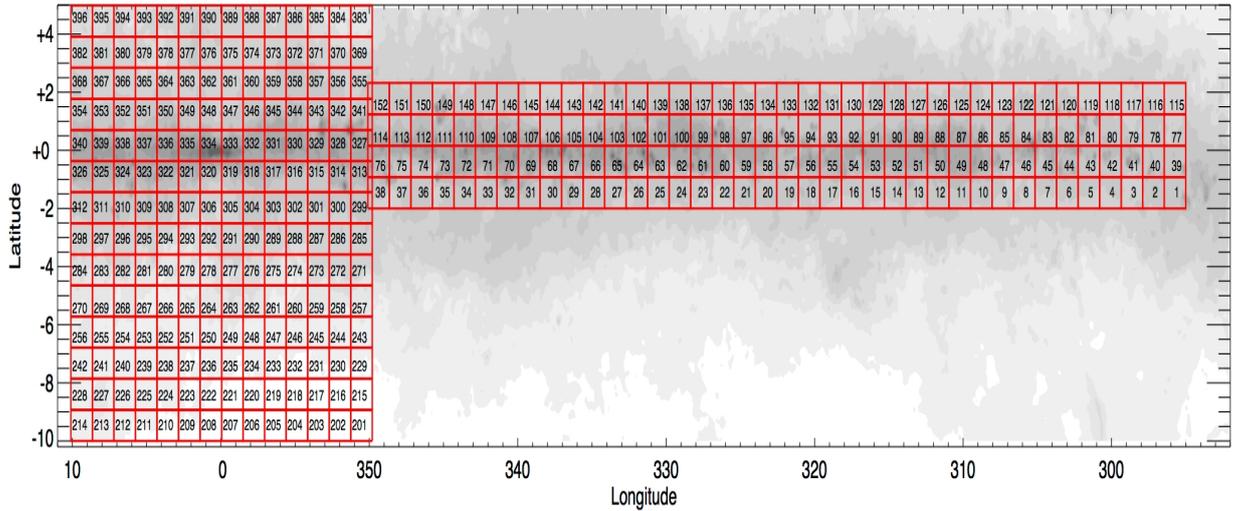


Figura 9: Área de cobertura del relevamiento VVV en coordenadas galácticas. En cuadros color rojo se representa a los diferentes Tiles, indicando en la Figura la numeración correspondiente a cada uno de ellos.

Actualmente se está desarrollando una extensión del relevamiento VVV, denominado "The VVV Extended ESO Public Survey, VVVX", cubriendo nuevas regiones del bulbo y del disco de la Galaxia, más precisamente la región $-130^\circ < l < 20^\circ$, en las bandas J, H y K_s (Minniti, 2018). La Figura 10 muestra el área cubierta por el relevamiento VVV, representada en color rojo, junto con el área de cobertura del VVVX, representada en los colores azul, celeste, amarillo y verde. VVVX proporcionará un catálogo profundo en las bandas J, H y K_s de aproximadamente 2×10^9 fuentes puntuales y un catálogo en la banda K_s de 10^7 fuentes variables. Dentro del área del VVV existente se logrará producir un mapa 5-D de la región estudiada combinando posiciones, distancias y movimientos propios de indicadores de distancia como estrellas RR Lyrae y variables Cefeidas, con el objetivo de develar la estructura interna de la Vía Láctea. En cuanto a los estudios extragalácticos, la combinación de VVV y VVVX permitirá buscar conexiones en los filamentos relacionados con el Gran Atractor, para poder obtener información sobre la distribución de galaxias en cúmulos de galaxias y filamentos en esta parte oscurecida del cielo.

1.2.1 Fotometría producida por CASU

El procesamiento de los datos del VVV es realizado por la unidad CASU (sigla en inglés de Cambridge Astronomy Survey Unit). CASU ha generado catálogos fotométricos a partir de imágenes en las bandas Z, Y, J, H y K_s . Los catálogos de CASU incluyen posiciones: ascensión recta y declinación; flujos y algunas medidas de forma de los objetos obtenidas utilizando diferentes aperturas, como por ejemplo el parámetro denominado "flag" que indica la clasificación morfológica más probable. Aquellos objetos que presentan $flag = -1$ corresponden a objetos estelares; con $flag = +1$ se identifican a los objetos no estelares; con $flag = -2$ a los objetos compactos (probablemente estelares); $flag = -7$ objetos que presentan píxeles malos; $flag = -9$ objetos saturados; y por último $flag = 0$ corresponde a

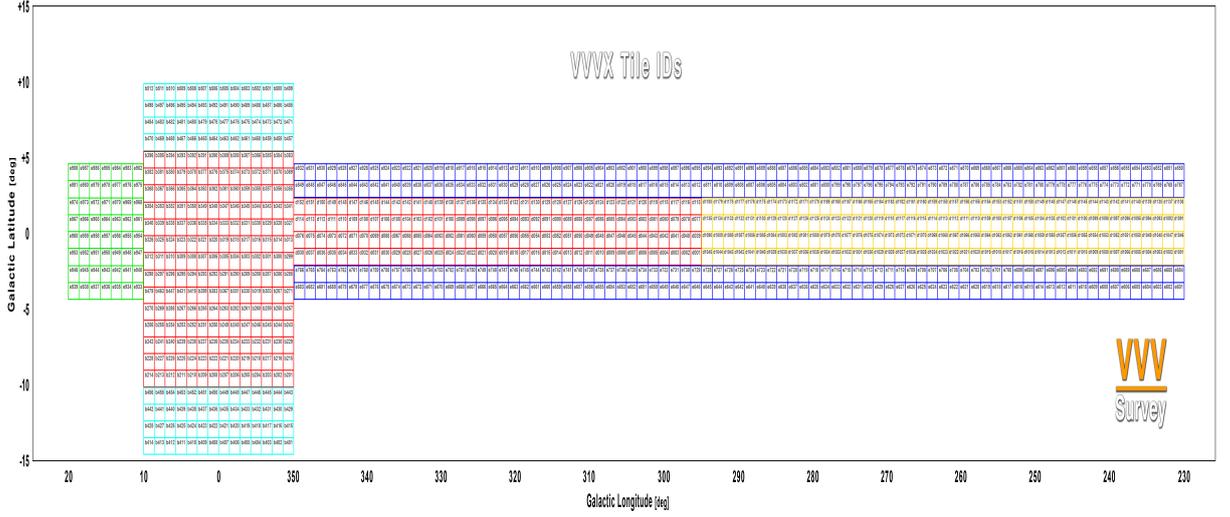


Figura 10: Área de cobertura del relevamiento VVVX y VVV en coordenadas galácticas. En cuadros de color rojo se representa a los Tiles del VVV y en color azul, celeste, amarillo y verde los nuevos Tiles que se incluyen en el VVVX.

ruido (Saito y col., 2012).

Los flujos obtenidos en las diferentes aperturas son convertidos a magnitudes a partir de la siguiente relación:

$$mag = ZP - 2,5\log_{10}(flux/exptime) - apcor - percorr \quad (1)$$

donde ZP es el punto cero, apcor es la corrección por apertura y percorr es la corrección basada en el brillo medio del cielo. Estos valores y las características fotométricas de la observación están detalladas en los encabezados correspondientes a cada observación, disponibles en la base de datos de CASU.

1.3 SELECCIÓN DE LAS REGIONES A ESTUDIAR

Para realizar este trabajo de tesis se estudiaron diferentes regiones del relevamiento VVV. A continuación se caracterizan estas regiones y se explica el por qué de la elección de cada una de ellas.

1.3.1 Tiles d_{010} y d_{115}

Para comenzar con el análisis de identificación y caracterización de fuentes extragalácticas en el relevamiento VVV, en primer lugar se seleccionaron dos regiones del VVV. Estas regiones corresponden al Tile d_{010} , centrado en las coordenadas J2000 $RA = 13h43m7,27s$, $Dec = -63^{\circ}57'15,84''$ ($l = 308,569^{\circ}$, $b = -1,650^{\circ}$) y al Tile d_{115} centrado en las coordenadas J2000 $RA = 11h50m18,72s$, $Dec = -60^{\circ}21'9,00''$ ($l = 295,438^{\circ}$, $b = 1,627^{\circ}$). Ambos Tiles fueron seleccionados debido a que no hay fuentes en NIR previamente detectadas en esas latitudes. De hecho, sólo en el Tile d_{010} , la galaxia HIPASS J1341-64 fué reportada por Kilborn y col. (2002) con una velocidad radial de 2473 km s^{-1} y recientemente, Staveley-Smith y col. (2016) detectaron, en estas regiones, dos galaxias utilizando datos del HIZOA: HI J1341-64

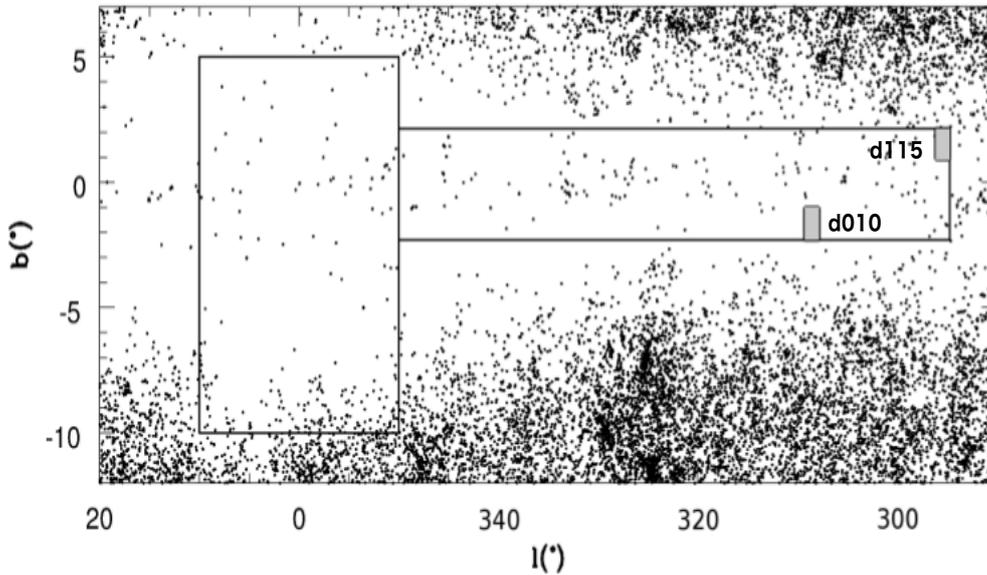


Figura 11: Representación del área de cobertura del relevamiento VVV junto con la distribución de objetos extensos catalogados en el relevamiento 2MASSX en coordenadas galácticas. Mediante rectángulos sombreados se muestran los Tiles estudiados, el Tile d115 en latitudes galácticas positivas y el Tile d010 en latitudes galácticas negativas.

y HI J1347-64.

La Figura 11 muestra la distribución en coordenadas galácticas de todas las fuentes extensas del relevamiento 2MASSX detectadas en regiones de bajas latitudes galácticas, además se incluye la representación del área de cobertura del VVV. Los Tiles d010 y d115 estudiados están representados mediante el área sombreada gris. Estos dos Tiles, se ubican en las regiones más periféricas del relevamiento VVV, correspondientes al disco de la Vía Láctea, en regiones donde hay menor densidad estelar y menor extinción interestelar.

La Figura 12 muestra la distribución normalizada de la extinción galáctica en la banda K_s para ambos Tiles. La misma fue obtenida utilizando los mapas de extinción galáctica de Schlafly y Finkbeiner (2011). Los valores medios de extinción encontrados son $AK_s = (0.86 \pm 0.32)$ mag para el Tile d010 y $AK_s = (0.42 \pm 0.08)$ mag para el Tile d115. En el Tile d010 se observa que la distribución de AK_s presenta mayor dispersión, dando cuenta de la presencia de regiones con mayor absorción. En esta figura y en todas las subsecuentes de este trabajo referidas a distribuciones normalizadas, N se define como $N = \frac{1}{N'} \frac{dN'}{d\psi}$, donde $\frac{dN'}{d\psi}$ es el número de objetos en un dado intervalo de la cantidad ψ . En el denominador N' se refiere al número total de objetos.

1.3.2 Tile b216

El Tile b216, a diferencia de los Tiles d010 y d115, se encuentra en la parte del relevamiento VVV que cubre el bulbo de la Galaxia. Las coordenadas J2000 del

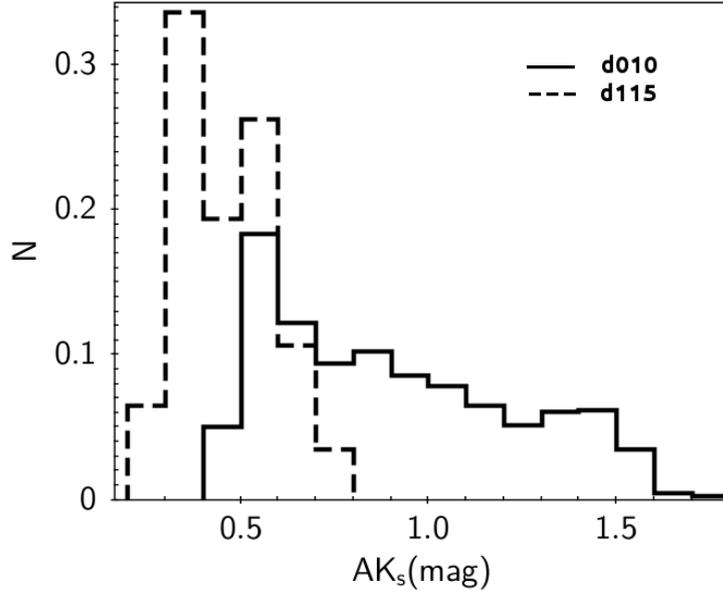


Figura 12: Distribuciones normalizadas de la extinción galáctica en la banda K_s de las regiones de los Tiles d010 y d115. La extinción correspondiente al Tile d010 se representa con línea continua y la del Tile d115 con línea cortada.

centro de este Tile son: $RA = 18h02m55,99s$, $Dec = -39^\circ57'7,92''$ ($l = 352.219^\circ$, $b = -8.597^\circ$). En la Figura 13 (al igual que la Figura 11) se representa el área de cobertura del relevamiento VVV con la ubicación del Tile b216 identificada mediante un rectángulo sombreado gris. La Figura 14 muestra la distribución de la extinción galáctica en la banda K_s para este Tile, la cual fue obtenida utilizando los mapas de extinción galáctica de Schlafly y Finkbeiner (2011). La mediana correspondiente a la extinción para este Tile es de $AK_s = (0.045 \pm 0.001)$ mag. Este Tile se encuentra en región con mucha menor extinción que la de los Tiles d010 y d115.

1.3.3 Tile d015

La motivación por estudiar este Tile en particular surge del descubrimiento visual de una concentración de objetos rojos. La misma fue descubierta cuando Barbá y col. (2015) buscaban cúmulos estelares en el disco de la Vía Láctea utilizando imágenes del relevamiento VVV. El Tile d015 está centrado en las coordenadas J2000 $RA = 14h43m42,14s$, $Dec = -61^\circ40'33,96''$ ($l=315.836^\circ$, $b=-1.650^\circ$). Al igual que los Tiles d010 y d115, este Tile se encuentra en las regiones más periféricas del disco galáctico, más precisamente en el cuarto cuadrante galáctico en la dirección del brazo de Scutum-Centaurus. En la Figura 15 (al igual que la Figura 11) se representa la ubicación del Tile d015 en el relevamiento VVV mediante un rectángulo sombreado gris. La Figura 16 muestra la distribución de la extinción galáctica en la banda K_s para este Tile, la cual fue obtenida utilizando los mapas de extinción galáctica de Schlafly y Finkbeiner (2011). La mediana correspondiente a la extinción para este Tile es de $AK_s = (0.733 \pm 0.002)$ mag.

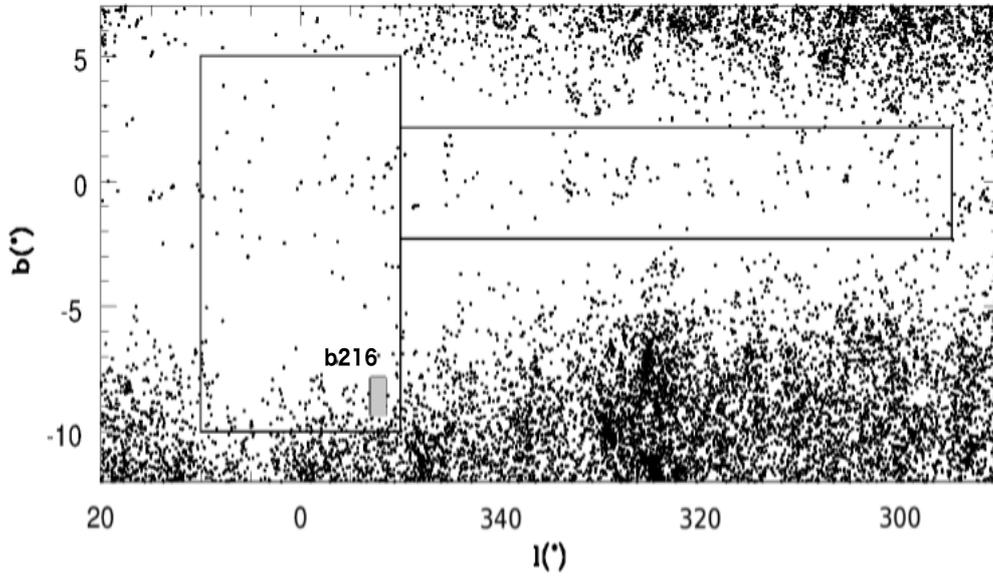


Figura 13: Representación del área de cobertura del relevamiento VVV junto con la distribución de objetos extensos catalogados en el relevamiento 2MASSX en coordenadas galácticas. El rectángulo sombreado representa el Tile d216.

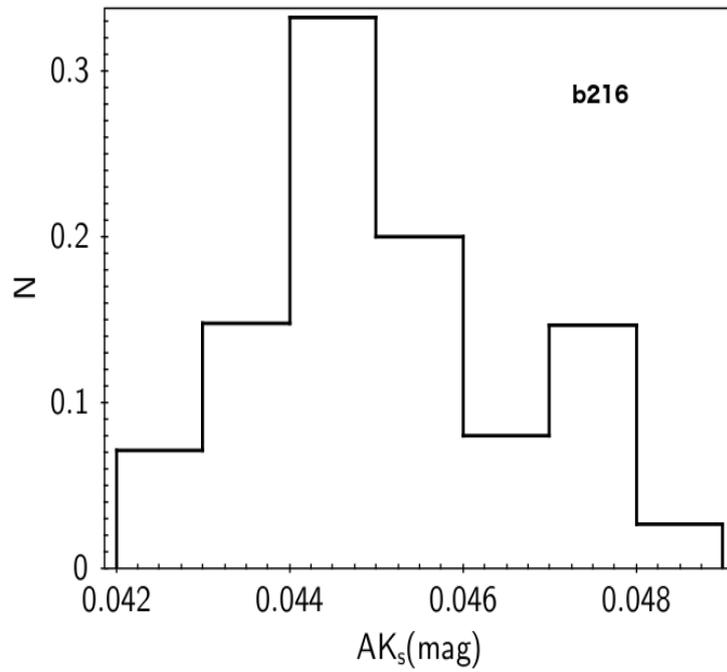


Figura 14: Distribución normalizada de la extinción galáctica en la banda K_s correspondiente a una región del Tile b206.

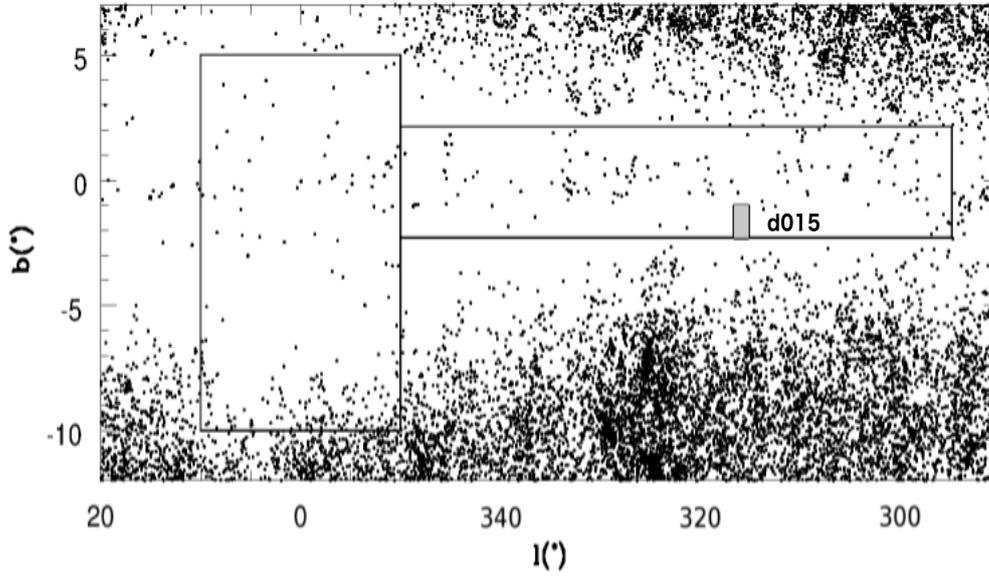


Figura 15: Representación del área de cobertura del relevamiento VVV junto con la distribución de objetos extensos catalogados en el relevamiento 2MASSX en coordenadas galácticas. El rectángulo sombreado representa el Tile d015.

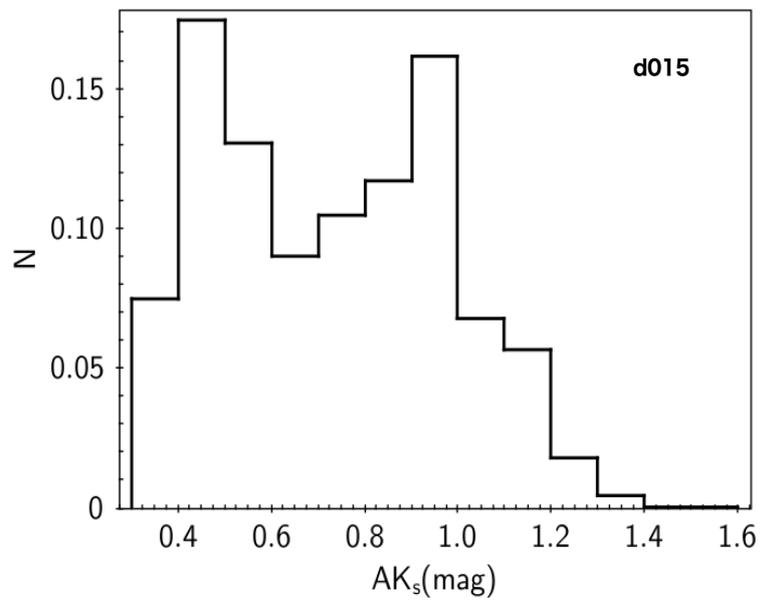


Figura 16: Distribución normalizada de la extinción galáctica en la banda K_s correspondiente al Tile d015.

EL PROCEDIMIENTO FOTOMÉTRICO

2.1 FOTOMETRÍA PRODUCIDA POR SExtractor + PSFEX

En las últimas dos décadas, los avances en la tecnología están modificando progresivamente el paradigma observacional tradicional en el que la mayoría de los estudios astronómicos se realizaban mediante observaciones individuales de pequeñas muestras de objetos. En la actualidad, los relevamientos modernos producen cantidades cada vez mayores de datos que no se pueden manejar de manera efectiva con los métodos tradicionales. Esto ha cambiado las necesidades de los astrónomos en términos de programas computacionales, paquetes y métodos de reducción de datos. Por ejemplo, el gran tamaño de los datos en bruto hace que sea prácticamente imposible volver a procesar las imágenes y, por lo tanto, los grandes catálogos se están convirtiendo en la principal fuente de información. Al extraer un catálogo, los aspectos principales a tener en cuenta son: detectar tantas fuentes como sea posible; minimizar la contribución de objetos espurios; separar correctamente las fuentes en sus clases (estrella - galaxia); producir mediciones precisas de cantidades fotométricas; y obtener estimas precisas de las posiciones de los centros de las fuentes.

Entre los principales paquetes de extracción de fuentes en imágenes astronómicas se encuentran SExtractor (siglas en inglés de Source Extractor, Bertin y Arnouts, 1996) y DAOPHOT (Stetson, 1987). SExtractor es un programa que funciona a partir de una red neuronal, que consiste básicamente en un grupo de unidades llamadas neuronas conectadas entre sí. Las mismas son capaces de guardar información (aprender) de ciertos procesos, mediante la repetición de variables (entrenamiento) en forma sucesiva y numerosa, y poder generalizar los resultados en un determinado contexto. De esta manera, SExtractor procesa automáticamente los datos produciendo un estímulo de salida, permitiendo la construcción de un catálogo de objetos de una imagen astronómica en formato FITS. SExtractor es utilizado comúnmente en astronomía extragaláctica, está particularmente orientado para reducir datos de grandes relevamientos de galaxias y trabaja óptimamente cuando los campos no son demasiados poblados. DAOPHOT se usa a menudo en combinación con una herramienta complementaria llamada ALLSTAR (Stetson, 1994), ambos fueron diseñados para realizar principalmente fotometría estelar. DAOPHOT junto con ALLSTAR, son capaces de producir fotometría más precisa para objetos estelares utilizando la técnica de ajuste a partir de la PSF. La fotometría mediante el ajuste de la PSF en SExtractor se produjo a fines de la década de 1990, pero su lanzamiento público fue después del 2010, a través del paquete PSFEX (siglas en inglés de PSF Extractor, Bertin, 2011). Esta herramienta extrae modelos precisos de la PSF a partir de imágenes que fueron previamente procesadas por SExtractor, los resultantes modelos de PSF son usados para mejorar el análisis fotométrico y morfológico de las fuentes detectadas ¹.

¹ <http://www.astromatic.net/software/sextractor>
<http://www.astromatic.net/software/PSFEX>

Diferentes trabajos se encuentran en la literatura mostrando la capacidad de estos programas para detectar y separar fuentes estelares de fuentes extensas. Por ejemplo, en el trabajo de Annunziatella y col. (2013) se compara el desempeño en la extracción en imágenes astronómicas usando la combinación de SExtractor y PSFEX con DAOPHOT y ALLSTAR, centrándose, en particular, en la completitud y fiabilidad de los catálogos extraídos, en la precisión de la fotometría y la astrometría. La principal conclusión de este trabajo es que DAOPHOT y ALLSTAR proveen una óptima solución para la fotometría de campos estelares, mientras que la fotometría dada por SExtractor y PSFEX es la indicada para el análisis de galaxias. Por otra parte, Mauro y col. (2013) crearon un procedimiento fotométrico, VVV-SkZ, usando DAOPHOT produciendo catálogos profundos de fotometría estelar con datos del relevamiento VVV.

Basándonos en los resultados del trabajo de Annunziatella y col. (2013), se decidió usar la combinación de SExtractor v2.19.5 y PSFEX v3.17.1 para llevar a cabo la detección, extracción y caracterización de fuentes extensas en el relevamiento VVV. A continuación se realiza una descripción de cómo funcionan SExtractor+PSFEX y cuáles fueron los parámetros adoptados al aplicarlos en determinadas regiones del VVV con el objetivo de obtener catálogos astrométricos y fotométricos de fuentes extensas.

2.1.1 SExtractor

SExtractor tiene la capacidad de extraer y hacer la fotometría de fuentes automáticamente, identificando regiones en imágenes astronómicas a partir de diferentes propiedades, como brillo, colores o formas, para luego usarse en diversos estudios extragalácticos. SExtractor es ideal para este tipo de trabajo debido a su flexibilidad y velocidad, lo que permite que muchas imágenes se procesen rápidamente, obteniendo como resultado catálogos con parámetros astrométricos y fotométricos. En este sentido, se encuentran en la literatura gran variedad de trabajos extragalácticos que utilizan SExtractor. Por ejemplo, Varela y col. (2009) obtienen la fotometría en las bandas B y V del Wide Field Nearby Galaxy-cluster Survey (WINGS), mientras que Durret y col. (2011) estudian la función de la masa y el redshift de cúmulos de galaxias usando datos del Canada France Hawaii Telescope Legacy Survey, CFHTLS². Como también, el trabajo de Nilo Castellón y col. (2014) en el que se obtienen parámetros morfológicos de galaxias en cúmulos de galaxias con baja luminosidad en rayos X.

SExtractor usa diferentes pasos para poder separar los objetos en las imágenes: determinación del fondo de cielo, detección de los objetos, separación de objetos vecinos (en inglés deblending), la separación estrella - galaxia y la fotometría. A continuación se describen brevemente cada uno de estos pasos:

2.1.1.1 Determinación del fondo de cielo

El valor medido en cada píxel de la imagen es función de la suma de la señal de la luz proveniente de los objetos y del fondo del cielo. Para ser capaz de detectar objetos débiles y poder medir con precisión sus flujos, es necesario tener buenas

² [http://www.cfht.hawaii.edu/ Science/CFHTLS/](http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/)

estimas del fondo de cielo en cualquier lugar de la imagen, es decir, tener disponible un mapa de fondo de cielo. Para construirlo, SExtractor divide a la imagen en una grilla y calcula una estima del fondo de cielo local para cada una de las mallas de la grilla. Luego aplica un filtrado para quitar posibles sobreestimaciones locales debido a estrellas brillantes. Es posible elegir el tamaño y número de las mallas de la grilla, lo cual es de suma importancia ya que si el tamaño es demasiado pequeño, la estima del fondo del cielo está afectada fuertemente por objetos individuales; y si es demasiado grande no se pueden reproducir las pequeñas variaciones de escala del fondo de cielo. En este trabajo se optó por usar un tamaño de malla de 8 píxeles.

2.1.1.2 *Detección*

Para que un objeto sea detectado debe contar con un número de píxeles por encima del umbral de detección. El área mínima en píxeles y el umbral de detección se especifican en el archivo de configuración. Para este proceso de detección se utilizó un mínimo número de píxeles adyacentes definidos por el flujo en la banda K_s de 1.0σ sobre el fondo de cielo, donde σ es la dispersión del mismo. Existe, además, la posibilidad de aplicar durante este paso un filtro para separar los objetos de bajo brillo superficial de las detecciones espurias, como pueden ser defectos ópticos, inhomogeneidades en las imágenes, rayos cósmicos, entre otros. Para ello, SExtractor aplica filtros de convolución sobre la imagen, donde la elección del filtro depende de las características de la imagen, como las condiciones atmosféricas, la región estudiada y la morfología de las fuentes. Hay diferentes tipos de filtros, entre los cuales podemos mencionar: "Filtro Top-Hat", el cual está optimizado para detectar objetos de bajo brillo superficial, este filtro funciona con un umbral de detección bajo; "Filtro Mexhat", produce un filtro pasabanda en la imagen, este filtro es adecuado para detecciones brillantes en campos estelares poblados y funciona con un umbral de detección alto; y el "Filtro Gaussiano", conjunto de funciones Gaussianas que favorecen a la detección de objetos extensos y débiles. Este último es el que se utilizó en este trabajo, la función Gaussiana fue definida en 5×5 píxeles con una máscara de convolución de FWHM de 3 píxeles.

2.1.1.3 *Separación de objetos vecinos (deblending)*

El deblending es una de las características más importantes de SExtractor, pues hace posible el análisis de objetos superpuestos. En este paso, SExtractor toma la decisión de si un grupo de píxeles adyacentes por encima del umbral es un único objeto o varios objetos. Esto se lleva a cabo usando un algoritmo que aplica una técnica de análisis de múltiples isofotas (Beard, MacGillivray y Thanisch, 1990). El deblending depende del número de niveles en los que se divide el perfil, en este trabajo el número utilizado fue de 64 y el contraste mínimo con el cual se mejora la separación de objetos superpuesto es de 0.002.

2.1.1.4 *Fotometría*

SExtractor tiene la posibilidad de calcular cuatro tipos diferentes de magnitudes: isofotal, isofotal corregida, apertura fija y apertura adaptativa. Para todas estas

magnitudes, se aplica una corrección aditiva de punto cero en el archivo de configuración para obtener las magnitudes en un sistema standard. A continuación se describen cada una de ellas:

Magnitud isofotal (MAG_ISO): el área de píxeles a la altura del umbral de detección es el área isofotal del objeto. El flujo dentro de esta área después de restar la contribución de fondo, es el flujo isofotal. Este valor por encima del umbral se convierte a una magnitud usando la ganancia efectiva y el punto cero de magnitud en la banda correspondiente.

Magnitud isofotal corregida (MAG_ISOCOR): en la realidad, los objetos raramente tienen sus flujos dentro de fronteras, parte del flujo está en los extremos de la distribución. SExtractor puede realizar una corrección para ello, la magnitud isofotal se ajusta para tener en cuenta el flujo en los extremos de la distribución, asumiendo que el perfil es aproximadamente Gaussiano simétrico para el objeto.

Magnitud de apertura fija (MAG_APER): esta magnitud corresponde al flujo por encima del fondo del cielo dentro de una apertura circular. Estas magnitudes de apertura circular fija son útiles para obtener colores. El diámetro de la apertura en píxeles es suministrada en el archivo de configuración.

Magnitud de apertura automática (MAG_AUTO): la magnitud automática o de Kron (Kron, 1980) se calcula utilizando una apertura elíptica ajustable alrededor de cada objeto detectado y mide el flujo dentro de ella. Esta fotometría de apertura automática de SExtractor está basada en la fotometría de Kron. La magnitud de apertura automática esta destinada a proporcionar la estimación más precisa de magnitudes totales, al menos para las galaxias.

La Figura 17 muestra una representación de como se calculan los cuatro tipo de magnitudes previamente descriptos. Se observa desde arriba hacia la izquierda la representación de las magnitudes MAG_ISO, MAG_AUTO, MAG_ISOCOR y MAG_APER. Los píxeles en escala de grises representan un ejemplo de una fuente detectada por SExtractor. Mediante línea continua (MAG_ISO, MAG_AUTO y MAG_APER) y en línea cortada (MAG_ISOCOR) se identifica el mejor ajuste geométrico empleado para definir la magnitud de la detección.

2.1.1.5 Separación entre estrellas y galaxias

Una vez detectado un objeto, la clasificación que realiza SExtractor basa su criterio de separación en una red neuronal. La red neuronal de SExtractor define a los objetos con 10 parámetros: 8 áreas isofotales, un parámetro correspondiente al pico de la intensidad del objeto, y otro parámetro de control que corresponde al seeing de la imagen. El resultado final de ejecutar las redes neuronales sobre una imagen se resume en el parámetro o índice de estelaridad CLASS_STAR, el cual toma valores entre 0 y 1, dependiendo de la forma del objeto detectado. CLASS_STAR = 1 para un objeto puntual (estrella) y CLASS_STAR = 0 para un objeto extenso (galaxia).

Por otro lado, en la nueva versión de SExtractor se incluye un nuevo separador estrella - galaxia, el parámetro SPREAD_MODEL, Φ . Este parámetro es un discriminante lineal normalizado entre el mejor ajuste local del modelo de PSF y un modelo

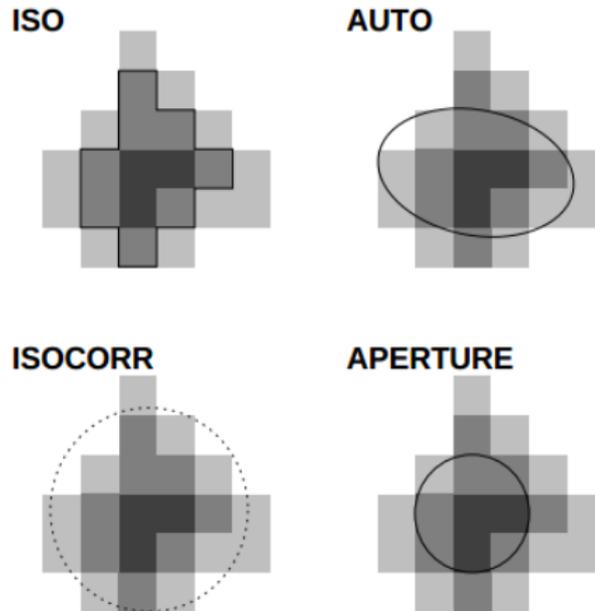


Figura 17: Ilustración de las cuatro aperturas posibles para el cálculo de las diferentes magnitudes proporcionadas por SExtractor. De arriba hacia la derecha: MAG_ISO, MAG_AUTO, MAG_ISOCOR y MAG_APER.

más extendido, realizado por el mismo modelo de PSF convolucionado con un modelo de disco exponencial. Una buena separación de estrellas se logra utilizando el siguiente valor de SPREAD_MODEL: $\Phi < 0.003$. Valor que fue reportado en el trabajo de Desai y col., 2012 quienes producen una muestra de estrellas con buena uniformidad espacial utilizando datos del relevamiento BCS (siglas en inglés de Blanco Cosmology Survey).

2.1.2 PSFEx

PSFEx crea diferentes modelos de PSF basados en imágenes previamente procesadas por SExtractor, y selecciona automáticamente las estrellas para computar estos modelos. En este trabajo se adoptó un kernel de 20×20 píxeles, y variaciones de tercer orden. Los modelos de la PSF son derivados usando fuentes puntuales no saturadas con señal sobre ruido $S/N > 20$; elongaciones mayores a 0.98; y un radio, $R_{1/2}$, que encierra el 50 % del flujo total del objeto en el rango de 0.5 a 0.9 segundos de arco. El mejor modelo de PSF es el que minimiza el χ^2 entre la distribución de flujo observado y el modelo propuesto. Por último el modelo adoptado de PSF es aplicado a las imágenes para mejorar la fotometría, y finalmente las magnitudes son estimadas integrando el flujo de las fuentes sobre el modelo.

2.1.3 SExtractor+PSFEX

A modo de resumen, los pasos que se utilizan en el procedimiento fotométrico son:

1. SExtractor crea catálogos, los cuales incluyen posición, morfología e imágenes asociadas a cada una de las detecciones.
2. PSFEX usa los catálogos de SExtractor y crea el mejor modelo de PSF tomando objetos no saturados, circulares, aislados y bien definidos, con el objetivo de modelar la PSF para cada fuente puntual.
3. Finalmente, SExtractor aplica el modelo de PSF a cada una de las fuentes para obtener propiedades astrométricas, fotométricas y morfológicas de precisión.

Para realizar este trabajo, se ejecutó SExtractor+PSFEX en cada una de las imágenes Z, Y, J, H y K_s de los Tiles d010 y d115 del relevamiento VVV. A modo de ejemplo, en la Tabla 3 se presentan los valores fotométricos de las imágenes en las diferentes bandas de los Tiles d010 y d115 utilizados para ejecutar SExtractor + PSFEX. Estos valores fueron extraídos de los "header" de cada una de las imágenes analizadas. En la primera columna se detallan los siguientes parámetros: tiempo de exposición, seeing, magnitud punto cero y la corrección por apertura, de la segunda a la sexta columna se especifican los valores de estos parámetros correspondientes a cada longitud de onda (Z, Y, J, H y K_s). La Figura 18 muestra el archivo de configuración de los parámetros que controlan los diversos procesos de SExtractor utilizado para realizar este trabajo.

La detección de las fuentes fue realizada sobre las imágenes en la banda K_s para cada Tile, debido a que de las 5 bandas del relevamiento, ésta es la banda más profunda en la que es posible detectar la mayoría de los objetos. En primer lugar, se correlacionaron todas las detecciones correspondientes a las bandas K_s con las demás bandas, utilizando una distancia radial de 0.1 segundos de arco. De esta manera, se han detectado simultáneamente en las bandas J, H y K_s un total de 752.233 fuentes en el Tile d010 y 310.283 fuentes en el Tile d115. Los resultados de las detecciones incluyen datos astrométricos y fotométricos, como las coordenadas, magnitudes PSF y magnitud de apertura circular, entre otros.

En este trabajo se utiliza la magnitud PSF (MAG_PSF), que es una magnitud dentro de una apertura elíptica adaptativa, la cual tiene en cuenta el flujo en los extremos de la distribución (Annunziatella y col., 2013). Esta magnitud es una estima de la magnitud total del objeto ya que es obtenida como una forma mejorada de la magnitud MAG_AUTO de SExtractor una vez aplicada la fotometría PSF. A partir del flujo total, SExtractor+PSFEX proporciona parámetros como el radio que encierra el 50% del flujo total del objeto $R_{1/2}$, la elipticidad, índice de Sérsic (n , Sérsic, 1968) y el índice de concentración (C , Conselice, Bershady y Jangren, 2000). Este último es calculado como la relación de dos radios circulares que contienen 80% y 20% del flujo total Petrosiano (Yasuda y col., 2001).

El modelo de Sérsic es una función matemática que describe el perfil de la luz de las galaxias y de sus componentes (Sérsic, 1968). Este modelo describe el brillo superficial $\Sigma(r)$ en función del radio r , y está expresado en la Ecuación 2. En ella,

```

# Default configuration file for SExtractor 2.3.5
# EB 2004-12-15
#----- Catalog -----
CATALOG_NAME          k1.cat          # name of the output catalog
CATALOG_TYPE          FITS_LDAC       # "NONE", "ASCII_HEAD", "ASCII", "FITS_1.0"
                                     # or "FITS_LDAC"
PARAMETERS_NAME       k1.param        # name of the file containing catalog contents
#----- Extraction -----
DETECT_TYPE           CCD              # "CCD" or "PHOTO"
FLAG_IMAGE            flag.fits       # filename for an input FLAG-image
DETECT_MINAREA        3                # minimum number of pixels above threshold
DETECT_THRESH         1                # <sigmas> or <threshold>, <ZP> in mag.arcsec-2
ANALYSIS_THRESH       1                # <sigmas> or <threshold>, <ZP> in mag.arcsec-2
FILTER                Y               # apply filter for detection ("Y" or "N")?
FILTER_NAME           gauss_3.0_5x5.conv # name of the file containing the filter
DEBLEND_NTHRESH       64              # Number of deblending sub-thresholds
DEBLEND_MINCONT       0.002           # Minimum contrast parameter for deblending
CLEAN                 Y               # Clean spurious detections? (Y or N)?
CLEAN_PARAM           1.0             # Cleaning efficiency
MASK_TYPE             CORRECT          # type of detection MASKing: "NONE", "BLANK", "CORRECT"

#----- Photometry -----
PHOT_APERTURES        5.88            # MAG_APER aperture diameter(s) in pixels
PHOT_AUTOPARAMS       1.5, 3.5        # MAG_AUTO parameters: <Kron_fact>, <min_radius>
PHOT_PETROPARAMS      2.0, 3.5        # MAG_PETRO parameters: <Petrosian_fact>,
PHOT_FLUXFRAC         0.2, 0.5, 0.8   # <min_radius> PIXELS
SATUR_LEVEL           30000.0         # level (in ADUs) at which arises saturation
MAG_ZEROPOINT         25.4            # magnitude zero-point
MAG_GAMMA             4.0             # gamma of emulsion (for photographic scans)
GAIN                  4.3             # detector gain in e-/ADU
PIXEL_SCALE           0.34            # size of pixel in arcsec (0=use FITS WCS info)
#----- Star/Galaxy Separation -----
SEEING_FWHM           1.07            # stellar FWHM in arcsec
STARNW_NAME           default.nnw     # Neural-Network_Weight table filename
#----- Background -----
BACK_SIZE             8                # Background mesh: <size> or <width>, <height>
BACK_FILTERSIZE       3                # Background filter: <size> or <width>, <height>
BACKPHOTO_TYPE        LOCAL           # can be "GLOBAL" or "LOCAL"
#----- Check Image -----
CHECKIMAGE_TYPE       APERTURES        # can be one of "NONE", "BACKGROUND", "MINIBACKGROUND",
                                     # "-BACKGROUND", "OBJECTS", "-OBJECTS", "SEGMENTATION",
                                     # "APERTURES" or "FILTERED"
CHECKIMAGE_NAME       checkfits       # Filename for the check-image
#----- Memory (change with caution!) -----
MEMORY_OBJSTACK       3000            # number of objects in stack
MEMORY_PIXSTACK       300000          # number of pixels in stack
MEMORY_BUFSIZE        1024           # number of lines in buffer
#----- Miscellaneous -----
VERBOSE_TYPE          NORMAL          # can be "QUIET", "NORMAL" or "FULL"

```

Figura 18: Archivo de configuración de SExtractor utilizado para la extracción de fuentes.

Tabla 3: Parámetros fotométricos de las imágenes correspondientes los Tiles d010 y d115 utilizados para ejecutar SExtractor+PSFEx .

Tile d010	Banda Z	Banda Y	Banda J	Banda H	Banda K _s
Tiempo de exposición [seg]	20	20	10	10	10
Seeing [seg. de arco]	1.44	1.21	0.92	1.01	0.82
Magnitud punto cero [mag]	24.02	23.61	23.78	23.92	23.08
Corrección por apertura [mag]	0.81	0.59	0.31	0.28	0.18
Tile d115	Banda Z	Banda Y	Banda J	Banda H	Banda K _s
Tiempo de exposición [seg]	20	20	10	10	10
Seeing [seg. de arco]	0.96	0.98	1.05	0.80	1.32
Magnitud punto cero [mag]	23.91	23.52	23.79	23.84	23.02
Corrección por apertura [mag]	0.38	0.39	0.41	0.24	0.49

Σ_e es el brillo superficial efectivo, r_e es el radio efectivo (o radio a mitad del flujo total) y $k(n)$ una constante de normalización. El parámetro más importante es el índice de Sérsic n y y es una generalización ya que para $n=4$ es un perfil de de Vaucouleurs y para $n=1$ es un perfil exponencial. De esta manera se pueden ajustar perfiles para diferentes tipos morfológicos de galaxias. Para calcular el índice de Sérsic, SExtractor+PSFEx computa un modelo para una componente simple del perfil de brillo usando un ajuste de Sérsic convolucionado con el modelo de PSF.

$$\Sigma(r) = \Sigma_e \exp\{k(n)[(r/r_e)^{(1/n)} - 1]\}. \quad (2)$$

Para estimar los colores de los objetos detectados se utiliza la magnitud de apertura (MAG_APER) en una apertura circular de 2 segundos de arco de diámetro (5.88 píxeles). El tamaño de la apertura fue elegido con el fin de disminuir la contaminación estelar que, en estas regiones cercanas al plano de la Galaxia, es de gran importancia.

Los parámetros mencionados anteriormente como CLASS_STAR, Φ , $R_{1/2}$, C serán utilizados, en primer lugar, para separar los objetos puntuales de los extensos, y una vez seleccionados los extensos caracterizar sus propiedades fotométricas y morfológicas.

2.1.4 Comparación fotométrica entre SExtractor+PSFEx y CASU

El principal objetivo del relevamiento VVV es estudiar las fuentes variables de la Galaxia, por lo que su fotometría está orientada fuertemente a objetos de tipo estelar. Por ello, es necesario catalogar todas las estrellas del bulge y parte del disco de la Vía Láctea. El objetivo de éste trabajo de tesis es diferente porque se centra en las fuentes extragalácticas que están oscurecidas por nuestra Galaxia. Además de aprovechar el hecho de que en estas regiones de baja latitud galáctica son muy pocas las fuentes extragalácticas detectadas por otros relevamientos. A modo de ejemplo, se presenta el análisis de la completitud y la eficiencia de detección de SExtractor+PSFEx y se comparan las posiciones y magnitudes de los objetos detec-

tados por SExtractor+PSFEx con los correspondientes a CASU para dos Tiles del relevamiento VVV.

2.1.4.1 Completitud y eficiencia de detección

Para poder estimar los niveles de completitud y las magnitudes límites que alcanzan las detecciones producidas por SExtractor+PSFEx, se utilizó un programa que permite calcular la tasa de detección de fuentes puntuales y extensas de SExtractor en imágenes ópticas e infrarrojas: ComEst (siglas en inglés de Completeness Estimator of source extraction on images) desarrollado por Chiu, Desai y Liu (2016). En primer lugar ejecuta SExtractor para detectar las fuentes observadas en la imagen, luego remueve dichas fuentes de la imagen y las reemplaza por un valor de fondo de cielo estimado por SExtractor, creando de esta manera una imagen libre de fuentes. Sobre esta imagen libre de fuentes, ComEst coloca fuentes sintéticas, simuladas a partir del programa GalSim (Rowe y col., 2015). Para simular las fuentes se considera una combinación de componentes bulge y disco convolucionadas con el modelo de la PSF y para ello se varía el radio que contiene el 50% del flujo total del objeto, la razón entre los ejes mayor y menor, y el ángulo de posición en un rango de magnitud K_s entre 14 y 20 mag. Las fuentes son ubicadas al azar sobre la imagen libre de fuentes asumiendo una densidad numérica de 15 fuentes por minuto cuadrado.

La Figura 19 muestra la completitud obtenida en la banda K_s para los Tiles d_{010} y d_{115} . Se puede observar que la eficiencia de detección alcanza el 50% alrededor de $K_s = 18.0$ mag para fuentes puntuales y extensas. Este valor está de acuerdo con los niveles de completitud obtenidos para CASU presentados por Saito y col. (2012). Las diferencias en ambos Tiles pueden estar relacionadas a los valores diferentes de extinción en cada Tile, mostrados en la Figura 12.

2.1.4.2 Comparación astrométrica y fotométrica

Con el fin de corroborar el procedimiento fotométrico propuesto, se procedió a comparar las posiciones y magnitudes de los objetos estelares detectados usando la fotometría de SExtractor+PSFEx con la de CASU. Las fuentes puntuales fueron seleccionadas a partir de los catálogos generados por CASU³ y clasificadas con $flag = -1$. Para los catálogos generados por SExtractor+PSFEx se seleccionaron aquellas fuentes que presentan un índice de estelaridad CLASS_STAR mayor que 0.9. Luego se correlacionan las fuentes de ambos catálogos con una distancia radial de 0.1 segundos de arco, de esta manera la comparación se realiza con objetos estelares de los dos procedimientos fotométricos.

Para comparar magnitudes se utilizó la magnitud de apertura, seleccionando una apertura circular de 2 segundos de arco de diámetro, que es la magnitud provista por CASU, y además se consideraron sólo aquellas fuentes con error en las magnitudes menores que 0.1 mag en ambos catálogos. Cabe aclarar que las magnitudes de SExtractor+PSFEx y de CASU están ambas corregidas por apertura, con la diferencia que las correcciones de apertura de CASU son de tipo diferencial las cuales varían a lo largo de la imagen (González-Fernández y col., 2018).

³ <http://horus.roe.ac.uk/vsa/>

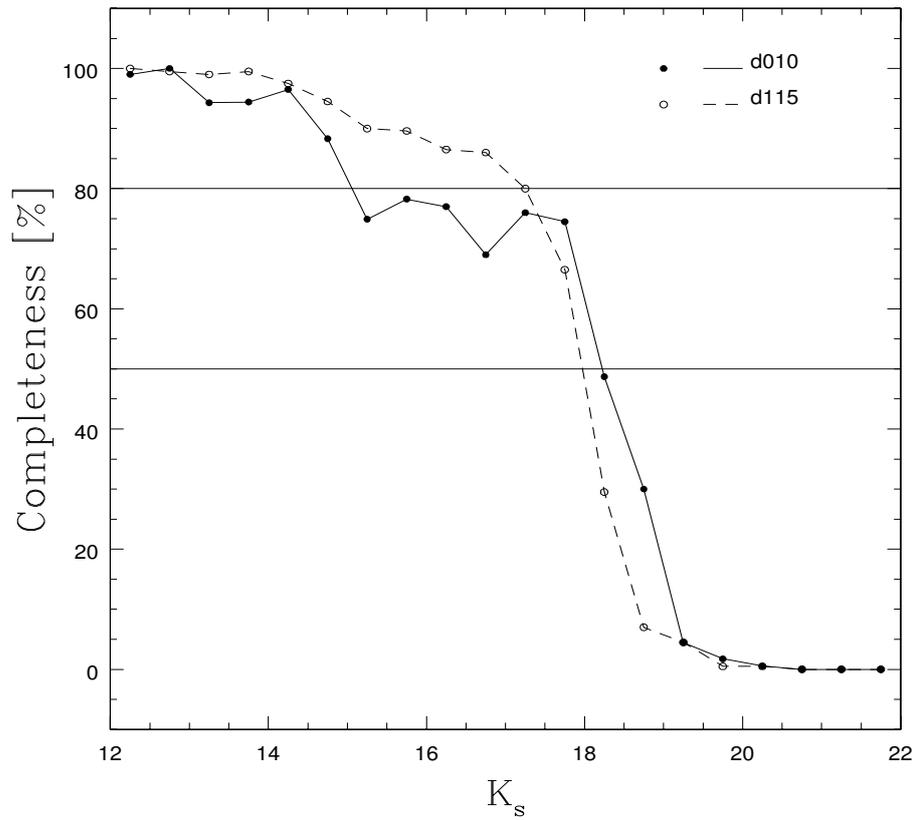


Figura 19: Completitud en porcentaje para la detección de fuentes puntuales y galaxias en la magnitud K_s . Círculos negros llenos y línea sólida corresponden al Tile d010, los círculos vacíos y líneas cortadas corresponden al Tile d115. También se representan mediante línea sólida los niveles de completitud del 80% y 50%.

La Figura 20 muestra, como mapa de densidad, la comparación en las posiciones de las fuentes puntuales detectadas en ambos Tiles usando el procedimiento de SExtractor+PSFEX y de CASU. Las distribuciones revelan un pequeño corrimiento con medianas en las diferencias de $\Delta RA \cos(\text{Dec}) = -4.38 \pm 0.04 \text{ mas}$ y $10.12 \pm 0.11 \text{ mas}$, y $\Delta \text{Dec} = -2.30 \pm 0.04 \text{ mas}$ y $19.19 \pm 0.11 \text{ mas}$ para el Tile d010 y d115, respectivamente. La precisión astrométrica lograda es muy buena, las incertidumbres en la posición son menores que las reportadas por Saito y col. (2012) de 175 mas para el relevamiento VVV en general.

La Figura 21 muestra las diferencias entre las magnitudes de apertura circular en las bandas J, H, y K_s obtenidas con SExtractor+PSFEX y las correspondientes a CASU, para las fuentes puntuales del Tile d115, es decir ΔJ , ΔH y ΔK_s en función de las magnitudes SExtractor+PSFEX. Las medianas de las diferencias obtenidas en las magnitudes son $\Delta J = 0.004 \pm 0.001 \text{ mag}$, $\Delta H = -0.014 \pm 0.001 \text{ mag}$ y $\Delta K_s = 0.046 \pm 0.001 \text{ mag}$. El mismo análisis para las fuentes puntuales del Tile d010 dió resultados similares. Las comparaciones en magnitud muestran pequeñas diferencias entre los dos procedimientos, especialmente en la banda J. Este efecto está relacionado con la manera en que se construyen los Tiles del relevamiento VVV (González-Fernández y col., 2018). Las variaciones de la PSF a lo largo del Tile causan diferencias espaciales sistemáticas en la fotometría. El proceso fotométrico desarrollado por CASU tiene en cuenta estas variaciones y le aplica a sus magnitudes una corrección por apertura diferencial. Las diferencias en la fotometría entre ambos procedimientos son menores que 0.1 mag , valor que está por debajo de nuestras incertezas. La Figura 22 muestra las mismas diferencias en las magnitudes de apertura en las bandas J, H y K_s comparada con los colores obtenidos con SExtractor+PSFEX, donde no se observa ninguna dependencia con el color.

Los resultados obtenidos durante la comparación astrométrica y fotométrica entre SExtractor+PSFEX y CASU son muy buenos. Esto muestra que SExtractor+PSFEX genera una fotometría compatible con la de CASU para los objetos estelares. De esta manera, estamos seguros que el método es adecuado para la búsqueda de fuentes extensas, para la obtención de la fotometría y análisis de los parámetros morfológicos y fotométricos de las mismas.

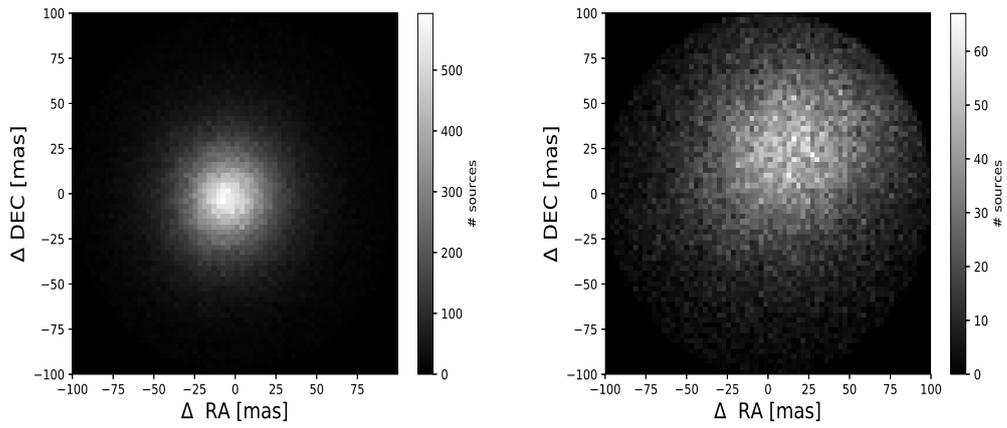


Figura 20: Comparación de las posiciones de las fuentes puntuales detectadas utilizando SExtractor+PSFEX y CASU. Las diferencias corresponden a $\Delta = \text{SExtractor+PSFEX} - \text{CASU}$ en Ascensión Recta y en Declinación. El panel izquierdo muestra los resultados obtenidos para el Tile d010 y el panel derecho los resultados para el Tile d115.

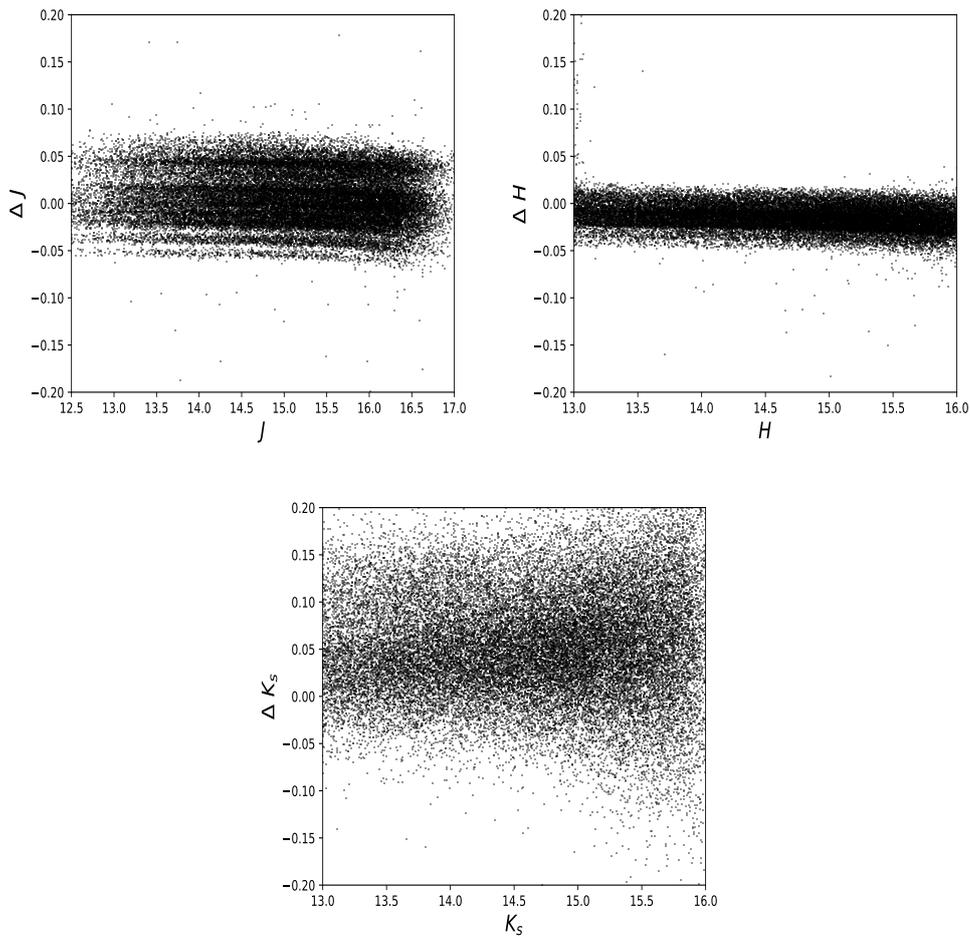


Figura 21: Comparación de magnitudes de fuentes puntuales. Los paneles muestran las diferencias en magnitudes entre SExtractor+PSFEX y CASU, ΔJ , ΔH y ΔK_s (izquierda a derecha), como función de las magnitudes SExtractor+PSFEX.

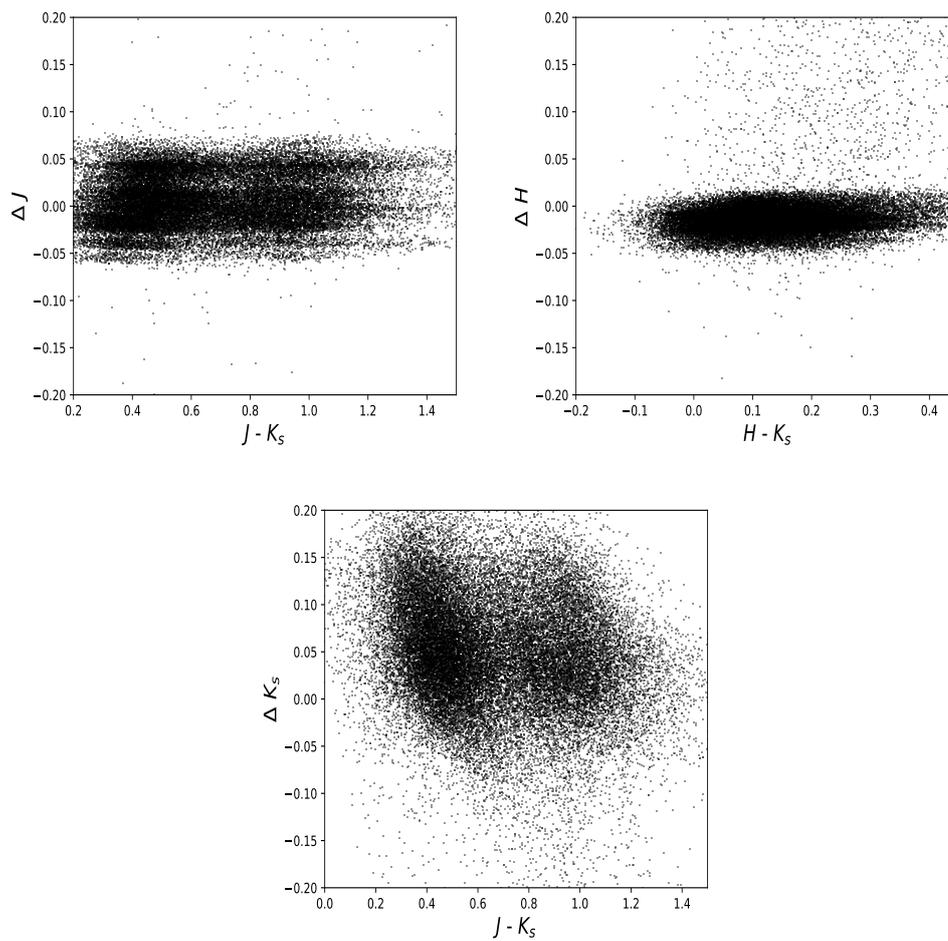


Figura 22: Dependencia de color de fuentes puntuales. Los paneles muestran ΔJ , ΔH y ΔK_s (izquierda a derecha) como función de los colores de SExtractor+PSFEx .

BÚSQUEDA DE OBJETOS EXTRAGALÁCTICOS

En este capítulo se presentan los resultados de la búsqueda de objetos extragalácticos usando la combinación de SExtractor+PSFEx en los Tiles d010 y d115 del relevamiento VVV. La identificación automática de objetos extragalácticos basada en parámetros morfológicos y fotométricos se realizó conjuntamente con una minuciosa inspección visual de los mismos. De esta manera se garantizó la calidad de la detección y de las características de los objetos encontrados.

3.1 CLASIFICACIÓN DE OBJETOS

Para obtener la clasificación de los objetos y poder separar las fuentes puntuales de las extensas se utilizó una combinación de cuatro parámetros morfológicos provistos por SExtractor + PSFEx: el radio que encierra el 50% del flujo total del objeto $R_{1/2}$; el índice de concentración, C ; el índice CLASS_STAR; y el parámetro SPREAD_MODEL, Φ . Estos parámetros fueron presentados en detalle en el Capítulo 2.

Utilizando los catálogos correspondientes a todos los objetos detectados simultáneamente en las bandas J, H y K_s de los Tiles d010 y d115, se observó el comportamiento de estos parámetros morfológicos antes mencionados en función de la magnitud PSF en la banda K_s observada. Este comportamiento es presentado en la Figura 23. Los paneles superiores muestran de izquierda a derecha $R_{1/2}$, C y Φ en función de la magnitud PSF K_s , para el Tile d010. Los paneles inferiores muestran lo mismo pero para el Tile d115. La barra de color lateral se relaciona con el índice de estelaridad CLASS_STAR. En esta Figura es posible observar que los objetos puntuales (CLASS_STAR cercano a 1) están representados mediante color rojo, y los objetos extensos (CLASS_STAR cercano a 0) mediante color violeta o azul. Utilizaremos el índice de estelaridad CLASS_STAR como primer indicador para separar a los objetos extensos de los objetos puntuales.

A modo de comparación, en la Figura 26 se puede observar las distribuciones correspondientes a los parámetros estructurales: índice de estelaridad CLASS_STAR y $R_{1/2}$, el brillo superficial central y el parámetro Φ obtenidos para estrellas y galaxias simuladas en el trabajo de Annunziatella y col. (2013). Los paneles superiores presentan (de izquierda a derecha) CLASS_STAR y $R_{1/2}$, y los paneles inferiores el brillo superficial central y el parámetro Φ todos estos en función de la magnitud de Kron en la banda K_s (magnitud estimada utilizando una apertura adaptativa, Kron, 1980). Con línea cortada se representan a los límites utilizados para separar estrellas de galaxias, aquellos objetos que presentan $CLASS_STAR < 0.98$; $\Phi > 0.005$ y $R_{1/2} > 2.0$ segundos de arco son, para estos autores, considerados galaxias. Además, como ya se ha mencionado, en el trabajo de Desai y col. (2012) los autores consideran que un buen corte para separar estrellas en las imágenes se logra considerando valores de $\Phi < 0.003$.

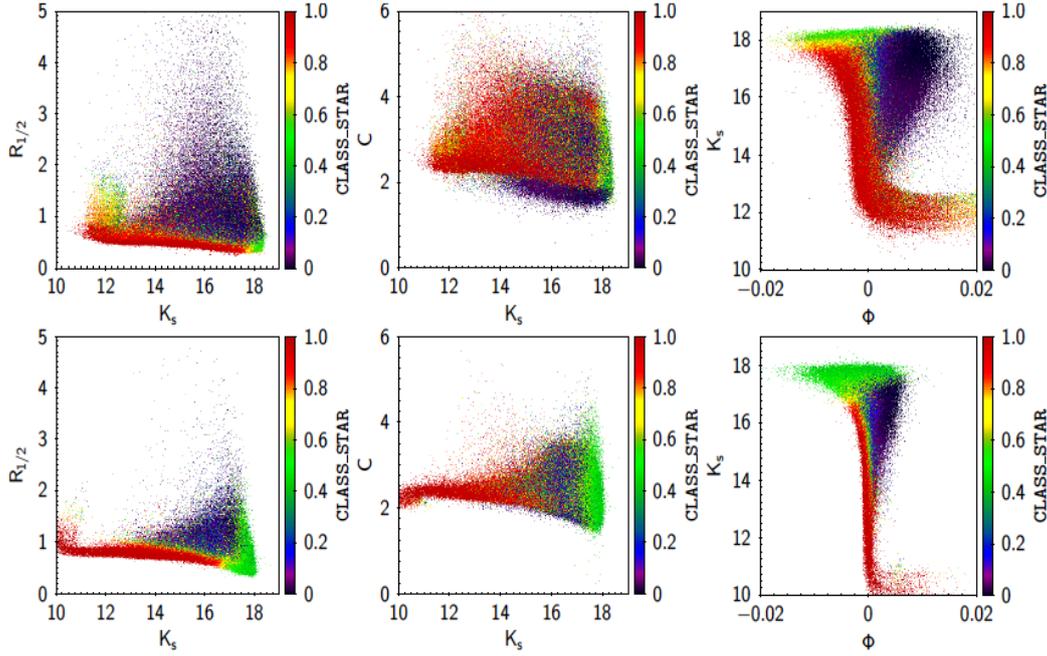


Figura 23: Diferentes parámetros morfológicos utilizados para clasificar a los objetos detectados en el Tile d010 (paneles superiores) y en el Tile d115 (paneles inferiores). Los paneles muestran (de izquierda a derecha) $R_{1/2}$ y C ; y el índice Φ , todos ellos en función de la magnitud PSF K_s . La barra de color esta relacionada con el índice de estelaridad $CLASS_STAR$.

A la hora de decidir el criterio para definir a los objetos extensos, se tuvo en cuenta el análisis del comportamiento de estos 4 parámetros morfológicos en nuestro trabajo y en los trabajos mencionados anteriormente. Por lo tanto el criterio para definir a los objetos extensos es:

$$CLASS_STAR < 0.3; 1.0 < R_{1/2} < 5.0 \text{ arcsec}; 2.1 < C < 5 \text{ y } \Phi > 0.002.$$

En la Figura 24 (para el Tile d010) y en la Figura 25 (para el Tile d115) se presentan nuevamente las distribuciones de los parámetros estructurales en función de la magnitud PSF K_s . En ambas Figuras, los paneles presentan (de izquierda a derecha) los valores de $R_{1/2}$, índice de concentración C , $SPREAD_MODEL$ y $CLASS_STAR$ todos en función de la magnitud K_s . Los puntos grises representan a todas las detecciones y los círculos llenos negros representan a los objetos extensos que satisfacen el criterio morfológico adoptado. En las Figuras se puede observar que las distribuciones de los parámetros morfológicos están mejor definidas para los objetos del Tile d115, esto podría ser debido a que los valores de extinción galáctica para este Tile son menores que los correspondientes al Tile d010 (Figura 12). De esta manera, del total de objetos detectados, se encuentran 17.889 y 7.055 objetos extensos en los Tiles d010 y d115, respectivamente. Estos valores representan alrededor del 2.4% del total de objetos detectados en ambos Tiles.

3.1.1 Corrección por contaminación estelar

A bajas latitudes galácticas, la contaminación por estrellas de fondo es importante debido al incremento en la población estelar a medida que nos acercamos

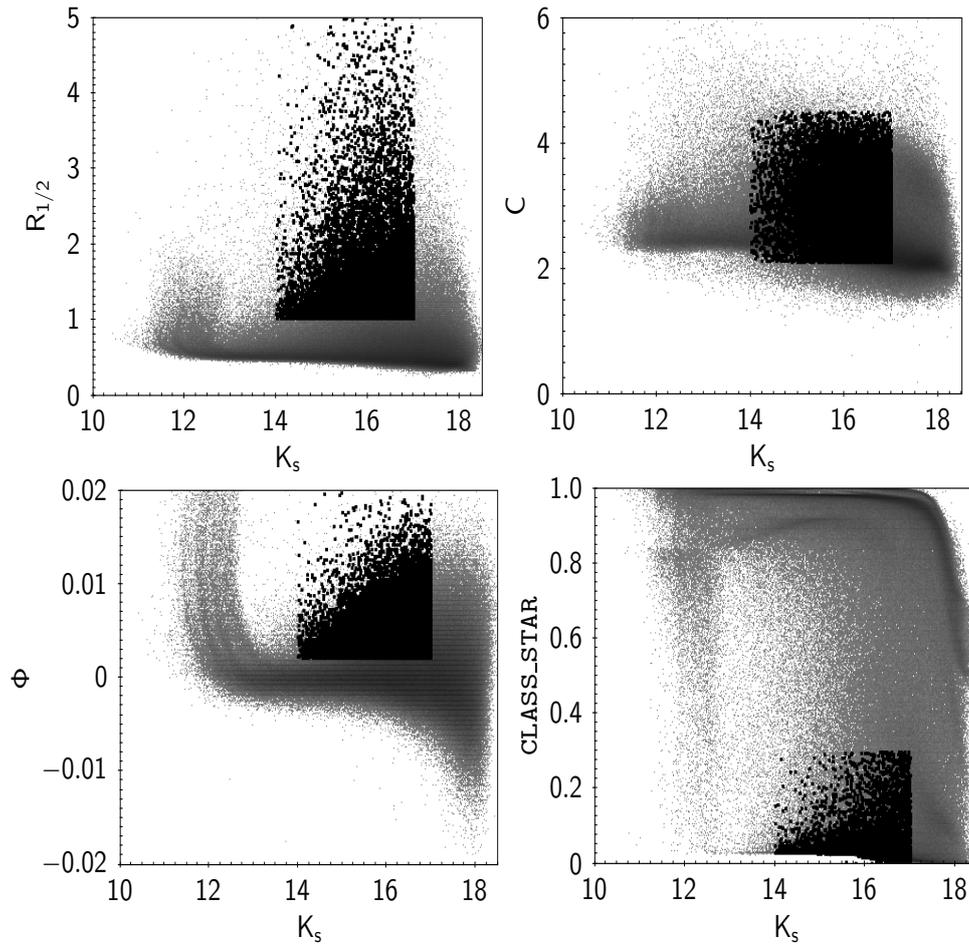


Figura 24: Diferentes parámetros morfológicos utilizados para clasificar a los objetos detectados en el Tile d010. Los paneles superiores muestran (de izquierda a derecha) $R_{1/2}$ y C ; y los paneles inferiores los índices Φ y $CLASS_STAR$, todos ellos en función de la magnitud PSF K_s . En círculos llenos de color negro se representan a los objetos extensos.

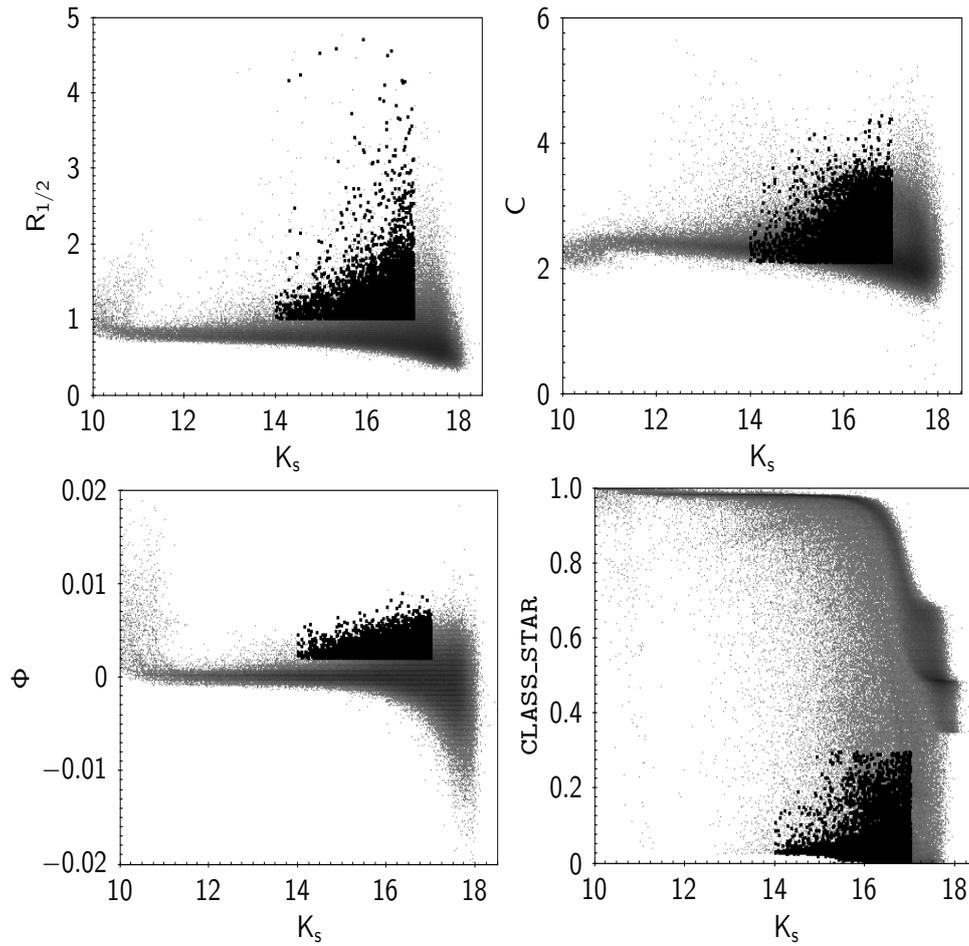


Figura 25: Diferentes parámetros morfológicos utilizados para clasificar a los detectados en el Tile d115. Los paneles superiores muestran (de izquierda a derecha) $R_{1/2}$ y C ; y los paneles inferiores los índices Φ y $CLASS_STAR$, todos ellos en función de la magnitud PSF K_s . En círculos llenos de color negro se representan a los objetos extensos.

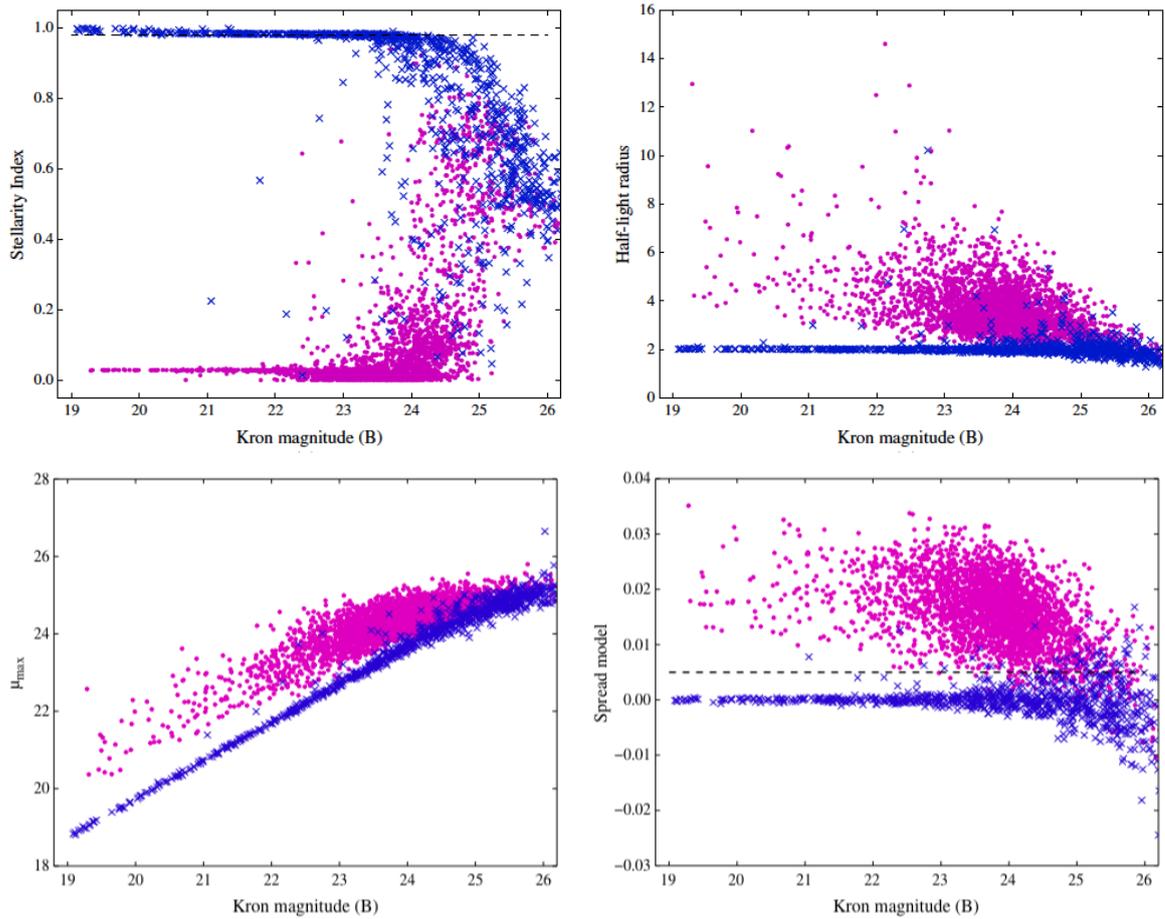


Figura 26: Distribuciones correspondientes a los índices de estelaridad CLASS_STAR, $R_{1/2}$ (paneles superiores), brillo superficial y el parámetro Φ (paneles inferiores) como función de la magnitud de Kron para estrellas (cruces azules) y galaxias simuladas (puntos magenta) extraídas del trabajo de Annunziatella y col. (2013). En líneas cortadas se representan los límites de separación en la clasificación estrella - galaxia.

al plano de la Vía Láctea. En este sentido, podemos mencionar el trabajo de Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014) quienes estudian propiedades fotométricas en NIR de galaxias en el ZoA, y el trabajo de Skelton, Woudt y Kraan-Korteweg (2009), donde se presenta un catálogo de nuevas galaxias en el cúmulo de Norma, las cuales están severamente afectadas por la aglomeración de estrellas, debido a la baja latitud galáctica en la que se ubica este cúmulo. Ambos trabajos plantean la necesidad de limpiar las imágenes de estrellas para poder luego obtener una fotometría más precisa de las galaxias. En estos trabajos utilizan una rutina generada a partir de IRAF¹ (Tody, 1993) llamada KILLALL desarrollada por Buta y McCall (1999), basada en las tareas del paquete DAOPHOT. En la Figura 27, extraída del trabajo de Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014), se presentan imágenes combinadas de ejemplos de galaxias en la región del ZoA muy contaminadas por estrellas antes y después de aplicar el proceso de subtracción de estrellas. Es posible apreciar la morfología real de estas galaxias una vez que se han limpiado las imágenes. Otro ejemplo se muestra en la Figura 28 extraída del trabajo de Skelton, Woudt y Kraan-Korteweg (2009). El panel izquierdo muestra la imagen en la banda K_s de la galaxia, donde se observa la presencia de estrellas cercanas. En el panel derecho se muestra la imagen de la misma galaxia una vez aplicada la rutina KILLALL. Se puede apreciar en ambas Figuras como se han eliminado todas las estrellas más cercanas a la galaxia, con el objetivo de poder estimar de la mejor manera la magnitud de las galaxias.

En este trabajo, luego de la identificación automática de las fuentes extensas llevada a cabo por SExtractor+PSFEx utilizando el criterio de separación antes mencionado, se realizó una minuciosa inspección visual como chequeo adicional de la identificación. De esta manera, se encontró que aproximadamente alrededor del 10 % de las fuentes extensas detectadas en los dos Tiles estudiados cuentan con la presencia de estrellas cercanas que pueden afectar la determinación precisa de sus magnitudes, así como la determinación de sus parámetros estructurales. Para corregir estas fuentes se implementó un proceso similar a KILLALL, para lo cual se utilizó el paquete DAOPHOT dentro de IRAF.

Durante la implementación del proceso de limpieza, en primer lugar se detectaron todas aquellas fuentes con flujo mayor a 4.0σ por encima del fondo de cielo y luego utilizando la tarea PHOT, se obtuvo la fotometría en una apertura fija para todas las fuentes detectadas en la imagen. Por otro lado, la tarea PSF dentro de DAOPHOT construye el modelo de PSF ajustando una función analítica a varias estrellas en la imagen. Los parámetros de la función se calculan eligiendo las mejores estrellas de la imagen, estrellas aisladas y no saturadas, teniendo en cuenta además su relación S/R. Una vez construido el modelo de PSF, se utiliza la tarea SUBSTAR, lo que hace esta tarea es substraer todas las estrellas de la imagen dando lugar a una imagen libre de estrellas. Con la imagen limpia de estrellas, se ejecuta nuevamente SExtractor+PSFEx y se obtienen los parámetros fotométricos de los objetos extensos sin la presencia de estrellas cercanas. La Figura 29 muestra un ejemplo de una fuente extensa contaminada en el Tile d115. En el panel izquierdo se presenta la imagen de esta fuente en la banda K_s y en el panel derecho la misma imagen luego de haberse aplicado el método de subtracción de estrellas

¹ IRAF: the Image Reduction and Analysis Facility is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. (AURA) under cooperative agreement with the National Science Foundation (NSF).

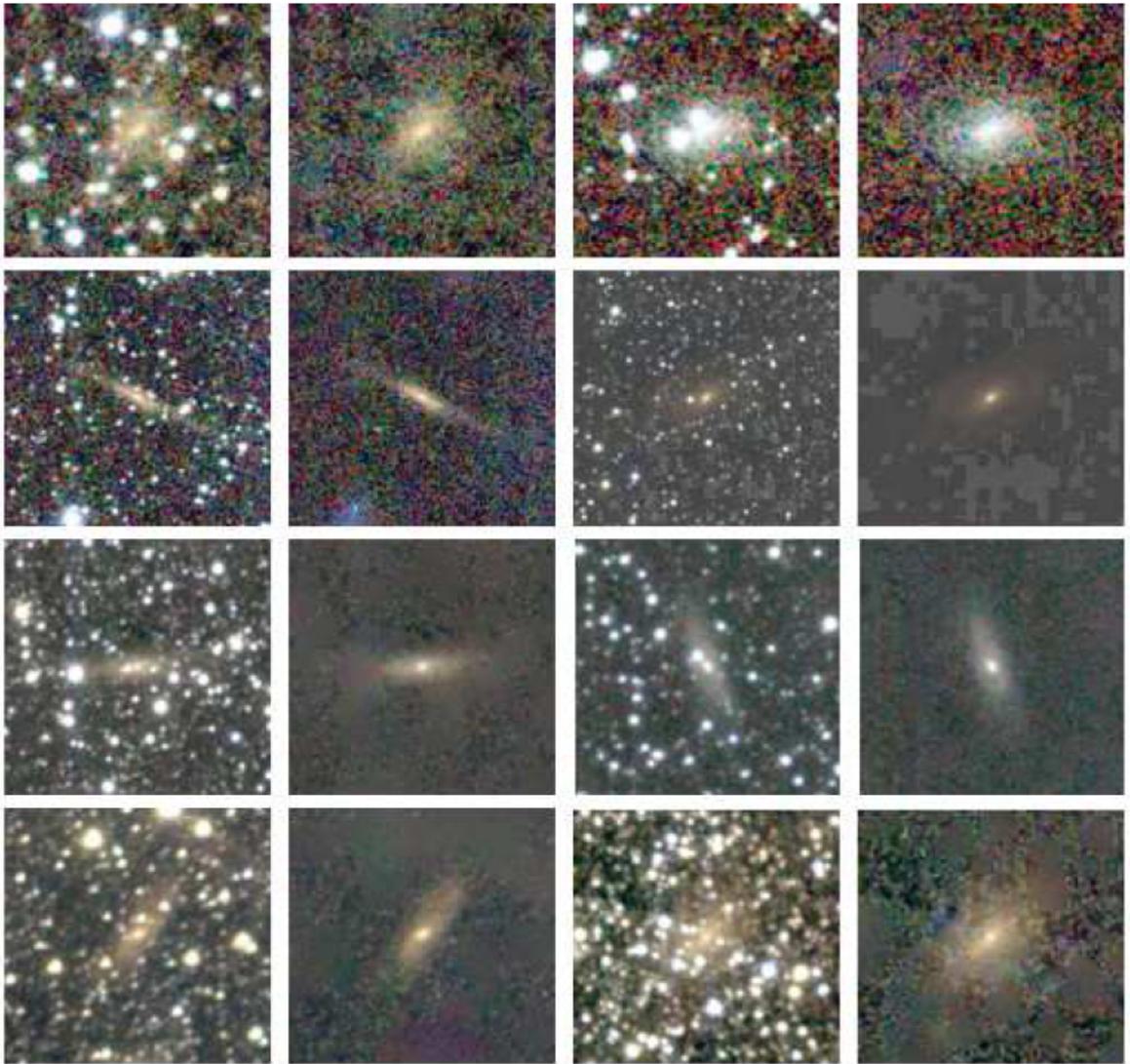


Figura 27: Imágenes de galaxias contaminadas por estrellas cercanas, extraídas del trabajo de Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014). Primera y tercera columna (de izquierda a derecha) muestran las imágenes de las galaxias detectadas. La segunda y cuarta columnas (de izquierda a derecha) muestran las imágenes de las mismas galaxias luego del proceso de substracción de estrellas.

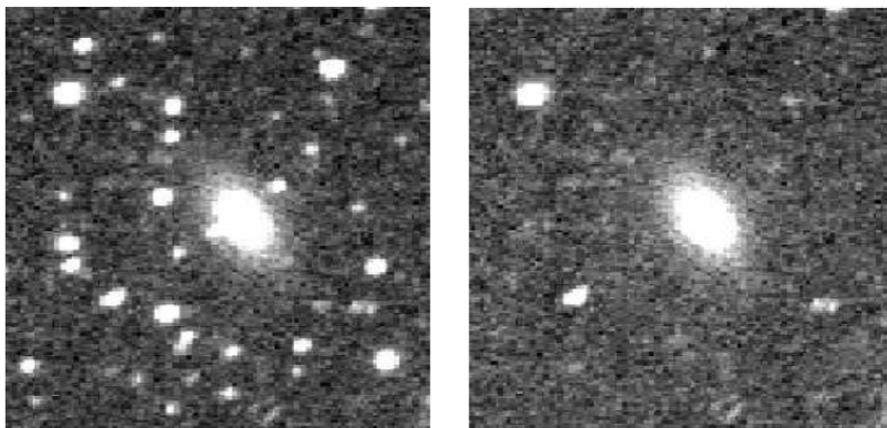


Figura 28: Panel izquierdo: Imagen en la banda K_s de una galaxia con la presencia de estrellas cercanas. Panel derecho: misma imagen luego de aplicar la rutina KILLALL para eliminar las estrellas cercanas a la galaxia. Imagen extraída del trabajo de Skelton, Woudt y Kraan-Korteweg (2009).

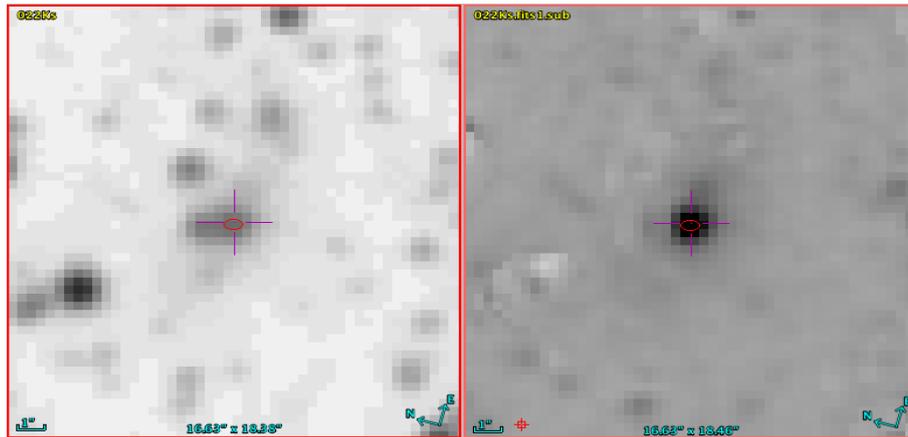


Figura 29: Ejemplo de una imagen en la banda K_s de una fuente extensa contaminada por una estrella cercana detectada en el Tile d115 (panel izquierdo), y la misma fuente luego de aplicarse la limpieza por estrellas cercanas (panel derecho).

aquí presentado.

Lograr una óptima sustracción de estrellas en imágenes de campos altamente poblados de estrellas, cercanos al plano de la Galaxia como son los del relevamiento VVV, es una tarea difícil y por momentos tediosa. En el desarrollo de esta parte del trabajo de tesis se corrigieron aproximadamente 50 objetos por contaminación estelar en ambos Tiles en todas las bandas detectadas. La tarea resultó mucho más difícil de implementar para imágenes en la banda K_s del relevamiento. En esta longitud de onda, las estrellas y los objetos extensos tienen un alto brillo superficial, y suelen ser detectadas como un sólo objeto. A medida que nos vamos a longitudes de onda más cortas, la tarea se simplifica, ya que el brillo superficial de la galaxia disminuye y se logra separar de la estrella. En algunos casos esta tarea fue extremadamente complicada de realizar, estos fueron casos donde la estrella estaba ubicada por encima del objeto extenso, y al sustraerla se eliminaban partes importantes de los mismos. Por este motivo, hubo objetos con propiedades fotométricas muy afectadas por las estrellas contaminantes que fueron descartados de las muestras a analizar.

3.1.2 Corrección por extinción Galáctica

El polvo dispersa y absorbe la luz proveniente de las estrellas de nuestra Galaxia y de los objetos que se encuentran detrás del plano de la misma. Este efecto, confirmado por Trumpler (1930), es conocido como extinción galáctica, y el mismo aumenta a medida que nos acercamos al plano de la Galaxia, debido a la gran cantidad de polvo presente en esa región. La extinción galáctica depende de la longitud de onda, siendo más importante en longitudes de onda cortas. En el infrarrojo cercano el efecto disminuye en comparación con el óptico, pero aún así no es despreciable. Debido a la absorción preferencial en longitud de onda, los diámetros y las magnitudes de los objetos extragalácticos se reducen, haciendo que los objetos afectados por la extinción se observen más rojos que los objetos no afectados. La extinción también varía con la línea de visión, pues existen diferentes densidades de polvo en las regiones de la Vía Láctea. Las leyes de enrojecimiento ayudan a poder predecir el cambio de magnitudes y colores de los objetos debido

Tabla 4: Valores de extinción relativa para los filtros Z, Y, J, H, K_s del relevamiento VVV extraídos del trabajo de Catelan y col. (2011).

Filtro	λ_{eff} [μm]	A_X/A_V	$A_X/E(B-V)$
Z	0.878	0.499	1.542
Y	1.021	0.390	1.206
J	1.254	0.280	0.866
H	1.646	0.184	0.567
K _s	2.149	0.118	0.364

a este fenómeno. En este sentido, Cardelli, Clayton y Mathis (1989) derivaron una ley de extinción promedio para longitudes de onda del infrarrojo, el óptico y el ultravioleta dada por la Ecuación 3.

$$R_V = \frac{A(V)}{E(B-V)} \quad (3)$$

Donde R_V es la constante de absorción selectiva. Esta constante es un indicador del ambiente y su valor depende de la línea de visión, por ejemplo para un medio interestelar difuso $R_V=3.1$ (Mathis 1990). La elección de la normalización de la extinción a $A(V)$ es debido a la abundancia de datos observados en esa longitud de onda (Cardelli, Clayton y Mathis, 1989).

Schlegel, Finkbeiner y Davis (1998), combinando datos en infrarrojo del proyecto DIRBE (siglas en inglés de Diffuse Infrared Background Experiment) llevado a cabo con el satélite COBE y datos del satélite IRAS (siglas en inglés de Infrared Astronomy Satellite) construyeron un mapa basado en la emisión del polvo de todo el cielo en $100 \mu m$. De acuerdo a estos mapas, en las cercanías del plano galáctico los valores de extinción, para longitudes de onda del óptico, pueden alcanzar hasta 30 magnitudes. Luego, Schlafly y Finkbeiner (2011) realizaron una recalibración de los mapas de polvo de Schlegel, Finkbeiner y Davis (1998) utilizando la diferencia entre los colores medidos y predichos de estrellas con espectros del Sloan Digital Sky Survey (York y col., 2000). Esta recalibración asume la ley de enrojecimiento de Fitzpatrick (Fitzpatrick, 1999) con $R_V = 3.1$.

El hecho de que el relevamiento VVV utiliza un conjunto de 5 filtros de diferentes bandas permite calcular índices libres de enrojecimiento, los cuales son de importancia para estudios en regiones de gran extinción, como lo son las regiones cercanas al plano de la Galaxia. Para obtener los índices libres de enrojecimiento, Catelan y col. (2011), asumen una ley de extinción estándar con $R_V = 3.09$ (Rieke y Lebofsky, 1985), y utilizando la ley de extinción de Cardelli, Clayton y Mathis (1989) obtienen los coeficientes de extinción relativos para los 5 filtros del relevamiento VVV. En la Tabla 4 se presentan los valores de los coeficientes de extinción para las bandas Z, Y, J, H y K_s, con sus respectivos valores de longitud de onda efectiva para el relevamiento VVV.

Debido a la ubicación cercana al plano galáctico de las regiones estudiadas en este trabajo, es necesario corregir las magnitudes por extinción galáctica. Para esto, se aplicó la corrección por extinción a lo largo de la línea de la visual usando

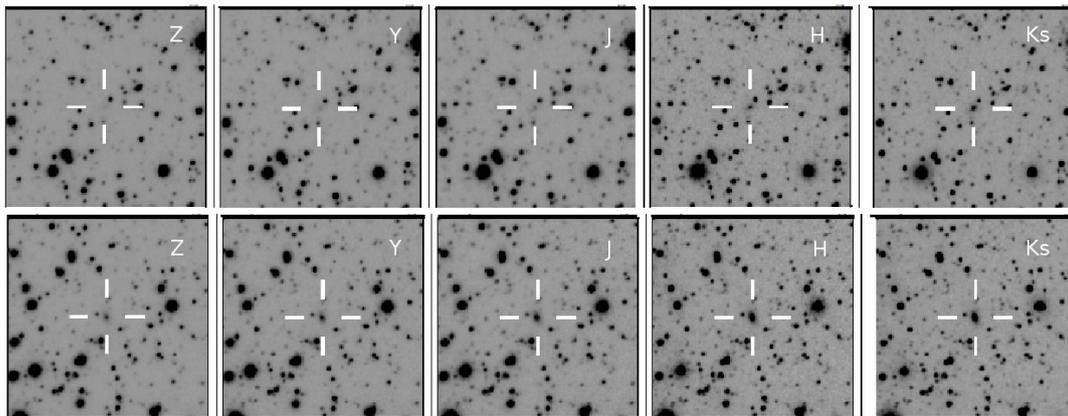


Figura 30: Ejemplo de fuentes extragalácticas detectadas en 3 bandas (panel superior) y en las 5 bandas (panel inferior) en los Tiles estudiados del relevamiento VVV.

una combinación de los mapas de extinción de Schlafly y Finkbeiner (2011) y los coeficientes relativos de extinción del relevamiento VVV de Catelan y col. (2011) presentados en la Tabla 4 en las magnitudes PSF y de apertura (utilizadas para calcular colores).

3.2 EL CRITERIO DEL COLOR

La combinación de SExtractor+PSFEx extrae fuentes por encima de un umbral de brillo superficial previamente definido, dando como resultado fuentes extensas que sólo son detectadas en las longitudes de ondas más largas del infrarrojo cercano, esto es, en las bandas J, H y K_s . Por consiguiente estas fuentes son muy débiles o no se logran detectar en longitudes de ondas más cortas, o sea en las bandas Z e Y del relevamiento VVV. La Figura 30 muestra imágenes de dos ejemplos de fuentes extensas detectadas en este trabajo en las 5 diferentes longitudes de onda. En el panel superior se puede observar el ejemplo que corresponde a una fuente detectada solamente en tres bandas (J, H y K_s); y en el panel inferior se observa el correspondiente a una fuente detectada en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s). Cabe aquí mencionar que los objetos estelares siempre presentan detección en las 5 bandas del relevamiento VVV, con un flujo más o menos constante.

Otro punto importante a tener en cuenta a la hora de clasificar objetos, es que SExtractor+PSFEx puede confundir algunos objetos débiles con estrellas dobles, agrupamientos de estrellas o bien asociaciones estelares de la Galaxia, los cuales pueden ser interpretadas como un objeto extenso. A modo de ejemplo, la Figura 31, extraída del trabajo de Jarrett y col. (2000a), muestra imágenes de diferentes tipos de estrellas dobles y galaxias detectadas en el relevamiento 2MASS con brillo superficial comparable. En el panel superior se observan los ejemplos de estrellas dobles y en el panel inferior las galaxias.

Los diagramas Color-Color resultan de gran utilidad para distinguir entre agrupaciones de objetos puntuales, como estrellas dobles o triples, y fuentes extensas, como galaxias. En este sentido, Amôres y col. (2012) y Jarrett y col. (2000a,b) han utilizado cortes en color para discriminar a los objetos extragalácticos. La Figu-

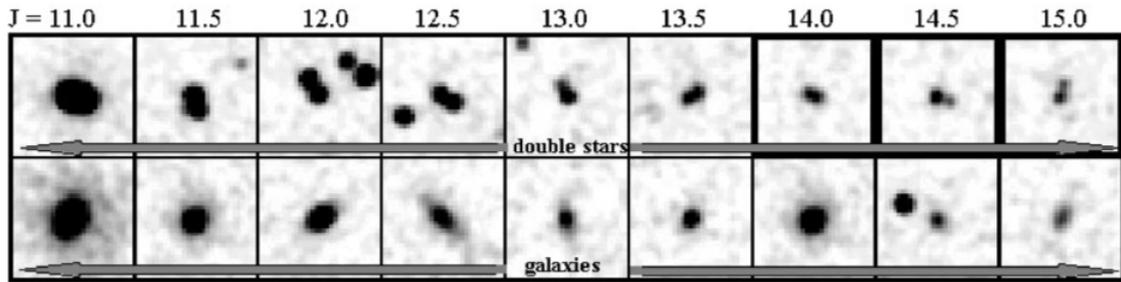


Figura 31: Ejemplo de imágenes de galaxias y estrellas dobles de brillo superficial comparable detectadas en el relevamiento 2MASS, extraída del trabajo de Jarrett y col. (2000a). El panel superior muestra gran variedad de estrellas dobles detectadas en el relevamiento 2MASS; y en panel inferior muestra galaxias con flujos totales integrados similares al de las estrellas del panel superior.

ra 32 muestra mapas de densidad Color-Color para fuentes estelares simuladas del relevamiento VVV, donde se incluyen los candidatos a galaxias reportados por Amôres y col. (2012). En el panel superior izquierdo de la Figura se observan los colores $(J - H)$ versus $(H - K_s)$, en el panel superior derecho los colores $(J - H)$ versus $(Y - J)$, y en el panel inferior $(Y - J)$ versus $(Z - Y)$. Los candidatos a galaxias están representados con símbolos de cruces (fuentes tipo I) y diamantes (fuentes tipo II) de acuerdo a la clasificación utilizada por los autores. Ellos clasifican a los candidatos a galaxias en dos categorías diferentes: fuentes de tipo I (posibles galaxias) tienen características fotométricas de galaxias y fuentes tipo II (probables galaxias) no tienen claras características de galaxias, necesitan una verificación adicional. De acuerdo a la Figura, los candidatos a galaxias reportados por Amôres y col. (2012) en el relevamiento VVV tienen los siguientes colores: $0.5 < (J - H) < 1.8 \text{ mag}$; $0.3 < (H - K_s) < 1.3 \text{ mag}$; $0.5 < (Y - J) < 1.5 \text{ mag}$ y $0.5 < (Z - Y) < 1.3 \text{ mag}$. Por otra parte, Jarrett y col. (2000a) usando el hecho de que el brillo de las galaxias en el IR está dominada por la población estelar más vieja y roja han definido una recta en el plano de los colores para separar fuentes extragalácticas de estrellas. La Figura 33 muestra diagramas Color-Color para zonas de baja densidad estelar (panel izquierdo) y zonas de alta densidad estelar (panel derecho) para estrellas dobles, triples y galaxias presentados en el trabajo de Jarrett y col. (2000a). En estos diagramas es posible ver como se separan estas fuentes respecto a sus colores. En el trabajo de Jarrett y col. (2000b) confirman usando espectroscopía la naturaleza extragaláctica de estas fuentes extensas, las cuales presentan colores intrínsecamente rojos, $(J - K_s) > 1.0 \text{ mag}$.

Para poder continuar con el proceso de clasificación de las fuentes detectadas, se analizan los colores correspondientes a las fuentes extensas. La Figura 34 muestra los diagramas Color-Magnitud y Color-Color para los objetos extensos detectados en las bandas J, H y K_s en el Tile do10 (paneles superiores) y en el Tile d115 (paneles inferiores), los cuales se representan con puntos pequeños. En esta instancia del proceso de clasificación de objetos se realiza nuevamente una inspección visual con el objetivo de garantizar la separación entre estrellas y galaxias. De esta manera, se encontró la presencia de falsas detecciones, principalmente estrellas dobles, triples y hasta asociaciones estelares más complejas propias de la Galaxia como las que se mencionaban en el trabajo de Jarrett y col. (2000a). Para eliminar estas falsas detecciones y poder separar de la mejor manera posible a los objetos extragalácti-

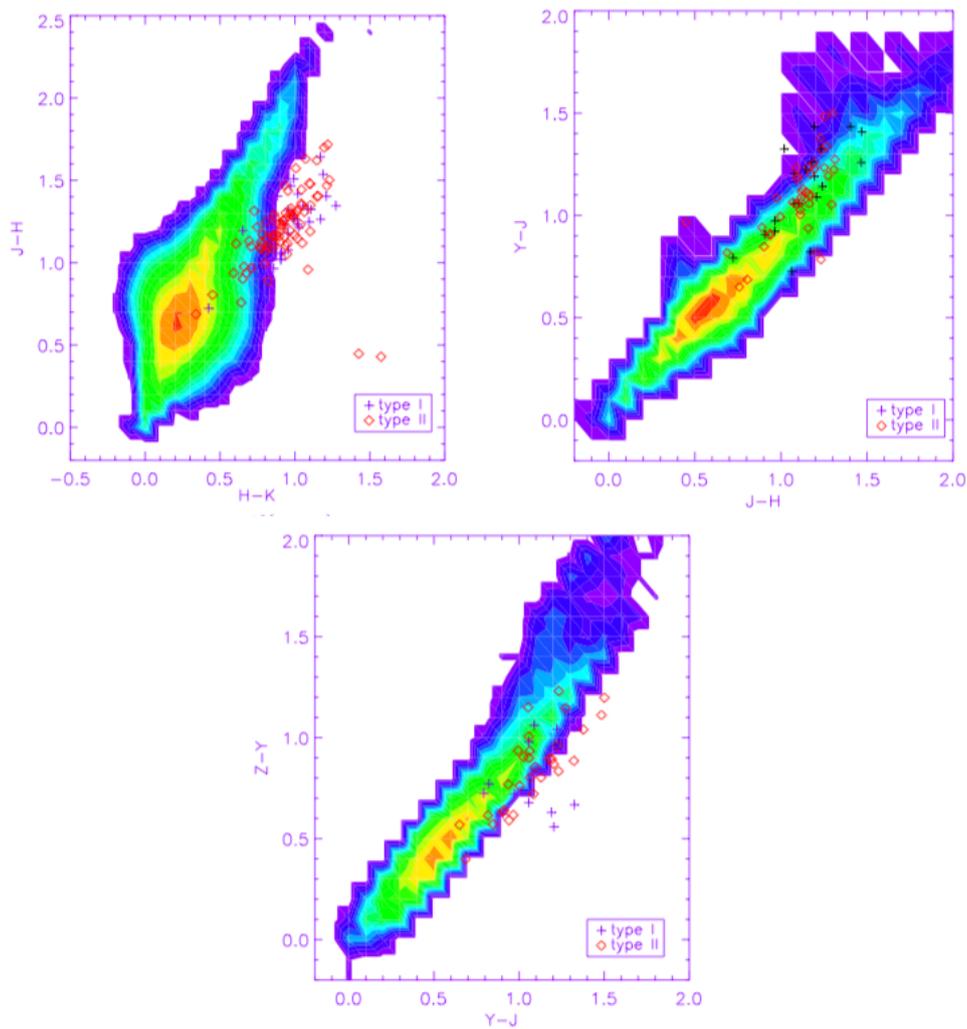


Figura 32: Mapas de densidad Color-Color para fuentes estelares simuladas del relevamiento VVV extraídos del trabajo Amôres y col. (2012). Panel superior izquierdo: $(J - H)$ versus $(H - K_s)$, panel superior derecho $(J - H)$ versus $(Y - J)$, y panel inferior $(Y - J)$ versus $(Z - Y)$. Los candidatos a galaxias reportados en este trabajo se representan con cruces (tipo I) y con diamantes (tipo II).

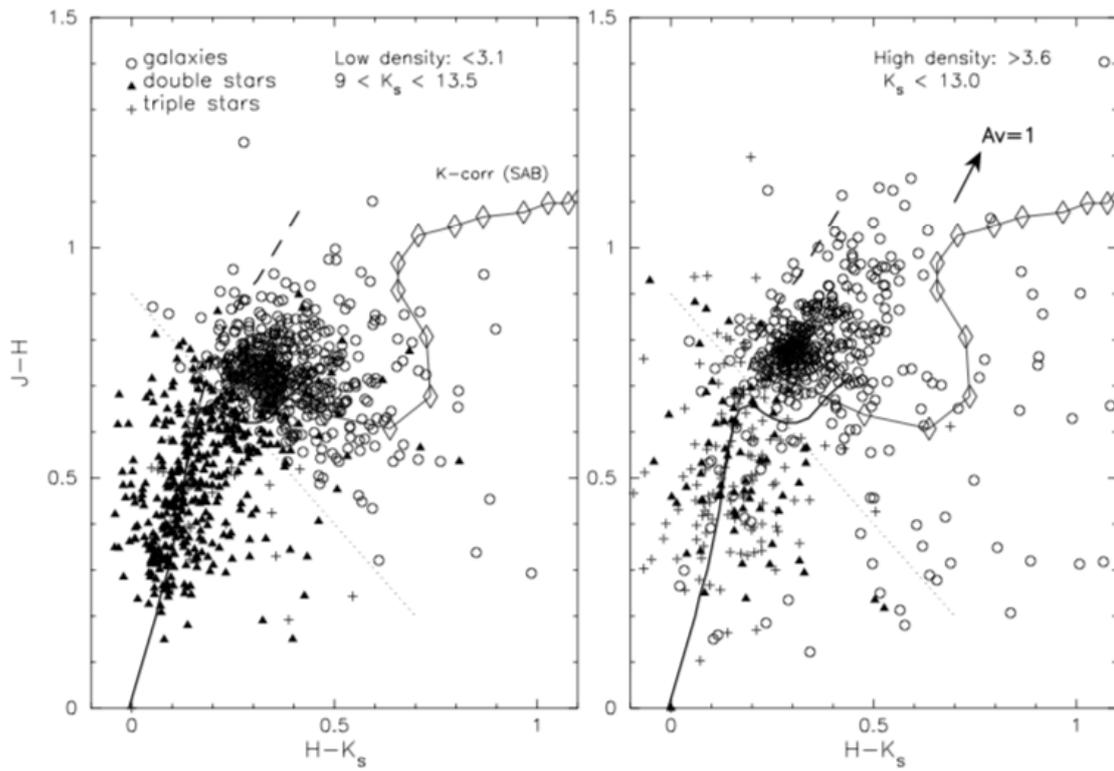


Figura 33: Diagramas Color-Color: $(J - H)$ versus $(H - K_s)$ de fuentes en regiones de baja densidad estelar (panel izquierdo) y zonas de alta densidad estelar (panel derecho) en el relevamiento 2MASS (Jarrett y col., 2000a). Las galaxias se representan con círculos, las estrellas dobles con triángulos, y las estrellas triples con cruces. La línea sólida demarca la secuencia principal.

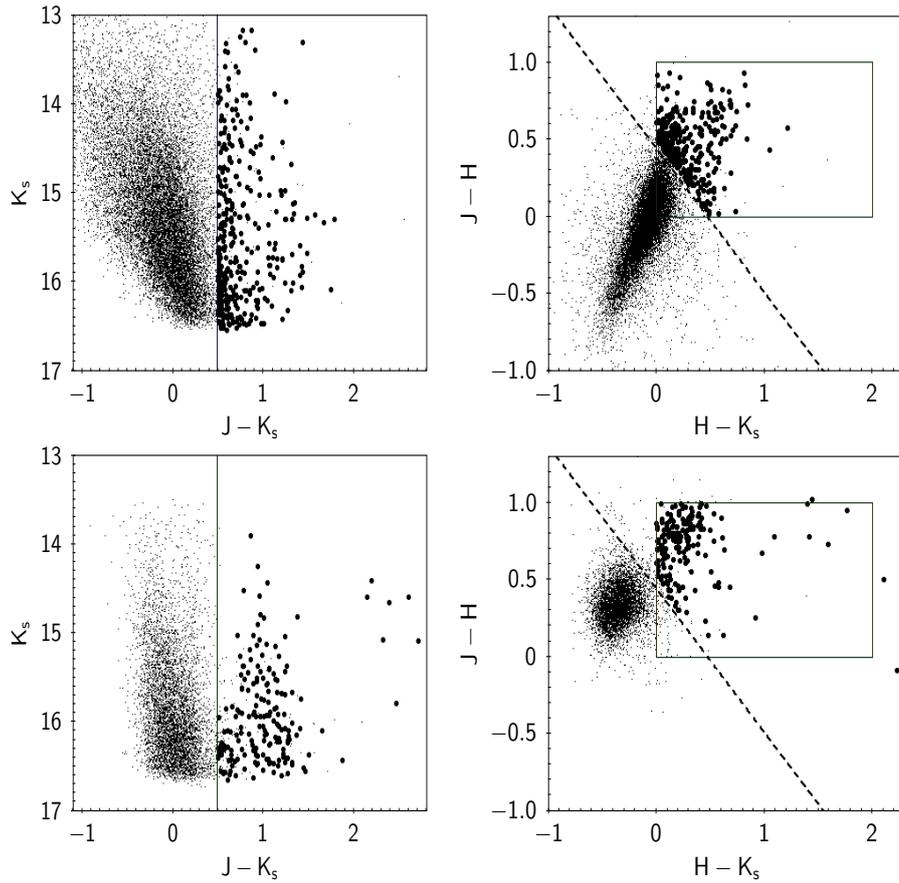


Figura 34: Diagramas Color-Magnitud y Color-Color para los objetos extensos detectados en las bandas J, H y K_s . En los paneles superiores se muestran las detecciones correspondientes al Tile d010 y en los paneles inferiores las correspondientes al Tile d115. Los puntos pequeños representan a los objetos extensos y los círculos más grandes representan a los objetos extragalácticos.

cos, agregamos al color como un criterio de clasificación adicional, basándonos en los análisis previos de Amôres y col. (2012) y Jarrett y col. (2000a,b), e incluyendo una minuciosa inspección visual de las fuentes. De esta manera se utilizaron los siguientes cortes en color para separar a los objetos extragalácticos de los objetos extensos:

$$0.5 < (J - K_s) < 2.0 \text{ mag}; 0.0 < (J - H) < 1.0 \text{ mag y } 0.0 < (H - K_s) < 2.0 \text{ mag.}$$

En la Figura 34 los cortes en los colores utilizados están representados con línea sólida, en círculos pequeños se representan a los objetos extensos y con círculos de mayor tamaño a los objetos extragalácticos. Además, para remover otros objetos espureos se ha definido una recta en el plano de los colores, la cual está representada en la Figura 34 con línea cortada. Por lo tanto, los objetos extragalácticos deben cumplir con la siguiente condición en los colores: $(J - H) + 0.9 (H - K_s) > 0.44 \text{ mag}$. Esta restricción adicional es similar al *Color_Score* definido en el trabajo de Jarrett y col. (2000a), utilizado para eliminar falsas detecciones. Se pueden observar en la Figura algunos objetos con colores más rojos que el resto, $(H - K_s) > 2$. Estos objetos son aquellos que presentaban una alta contaminación estelar debido a estrellas brillantes muy cercanas y se les ha aplicado la corrección recientemente detallada.

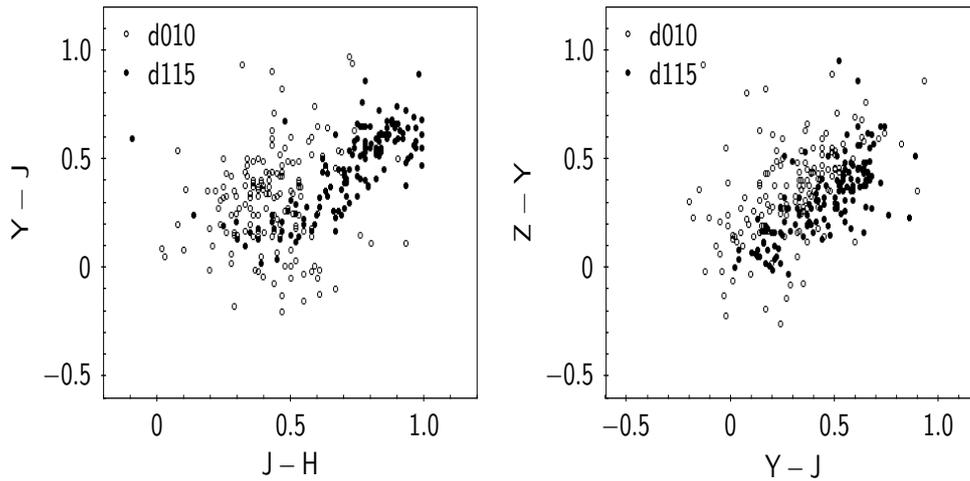


Figura 35: Diagrama Color-Color de los candidatos a objetos extragalácticos detectados en las 5 bandas. Con círculos abiertos se representan a las detecciones en el Tile d010 y en círculos llenos a las detecciones en el Tile d115.

Del total de objetos extragalácticos detectados, hay algunos objetos que sólo fueron detectados en 3 bandas J, H y K_s , y otros en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) del relevamiento VVV. Prestando particular atención a las detecciones en 5 bandas, la Figura 35 muestra los diagrama Color-Color (Y - J) versus (J - H) y (Z - Y) versus (Y - J) para los objetos extragalácticos detectados el Tile d010, representados con círculos abiertos, y para el Tile d115, representados con círculos llenos. Estos objetos extragalácticos satisfacen además los siguientes colores: $-0.3 < (Y - J) < 1.0$ mag y $-0.3 < (Z - Y) < 1.0$ mag. Utilizando todos los criterios de separación propuestos, se han detectado en total 345 y 185 candidatos a objetos extragalácticos en los Tiles d010 y d115, respectivamente. Del total, 193 (Tile d010) y 43 (Tile d115) fueron detectados sólo en las bandas J, H y K_s . El resto, 152 (Tile d010) y 142 (Tile d115) fueron detectados en las 5 bandas del relevamiento.

3.3 RESUMEN: DIAGRAMA DE FLUJO

La Figura 36 muestra el diagrama de flujo representando el algoritmo de detección y clasificación de fuentes extragalácticas desarrollado durante este Capítulo. Los objetos extragalácticos que fueron detectados son, en general, de forma más extendida y más rojos que el resto de las fuentes presentes en las imágenes combinadas. Todos los candidatos a objetos extragalácticos fueron visualmente chequeados, y confirman la robustez del criterio de selección adoptado en este trabajo. En este sentido, esta inspección visual se considera como un límite de confiabilidad del procedimiento adoptado para detectar fuentes extragalácticas. Sin embargo, es importante mencionar que la confirmación final de la naturaleza extragaláctica de estas fuentes, debe ser dada por los datos espectroscópicos.

La Figura 37 muestra la distribución de los candidatos a objetos extragalácticos detectados en los Tiles d010 y d115 en coordenadas galácticas. Se distinguen aquellos objetos detectados solamente en tres bandas con círculos de los objetos detectados en las cinco bandas con cruces. Además, se incluyen en esta Figura los objetos extragalácticos catalogados en el relevamiento 2MASSX en las vecindades de las regiones estudiadas, los cuales están representados con triángulos. Esta Figu-

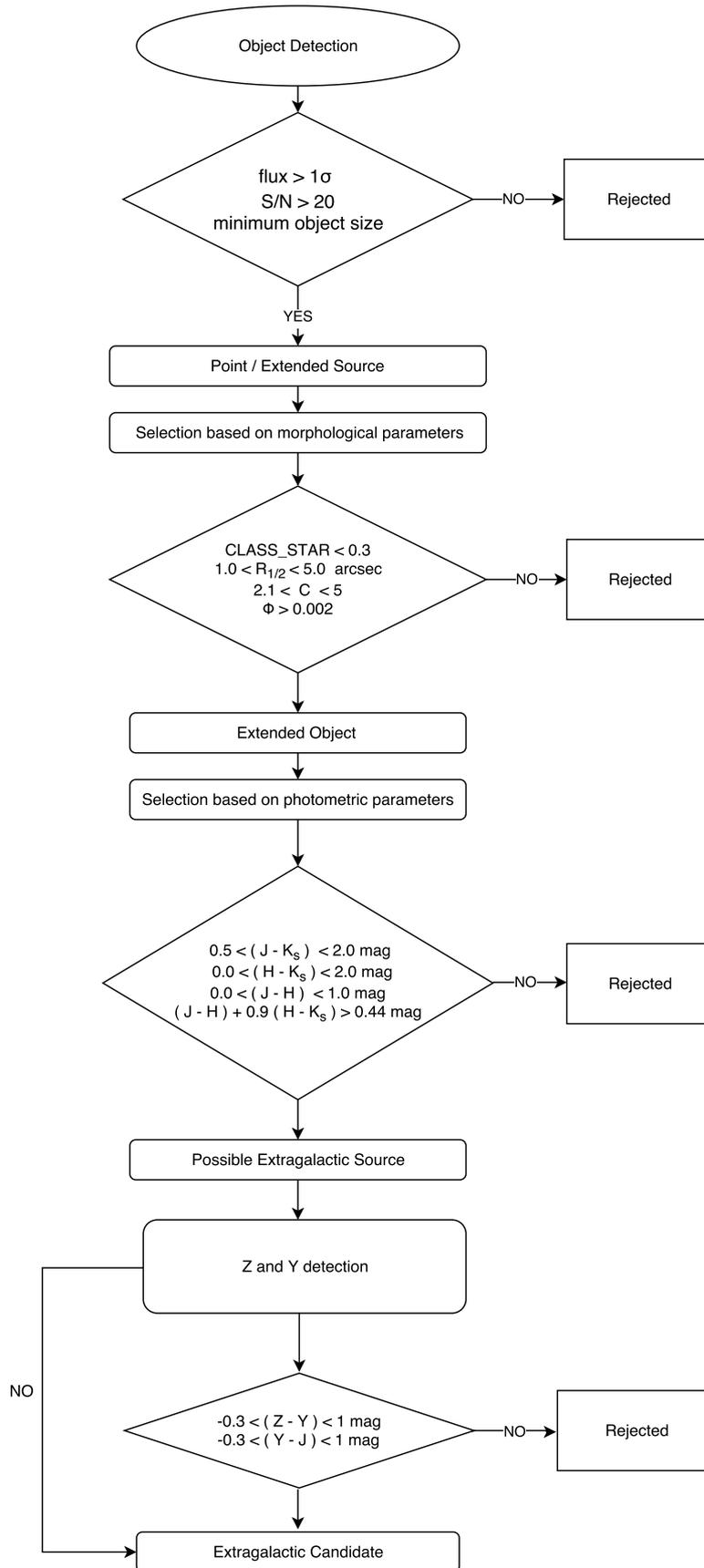


Figura 36: Diagrama de flujo del algoritmo completo de selección de candidatos a fuentes extragalácticas.

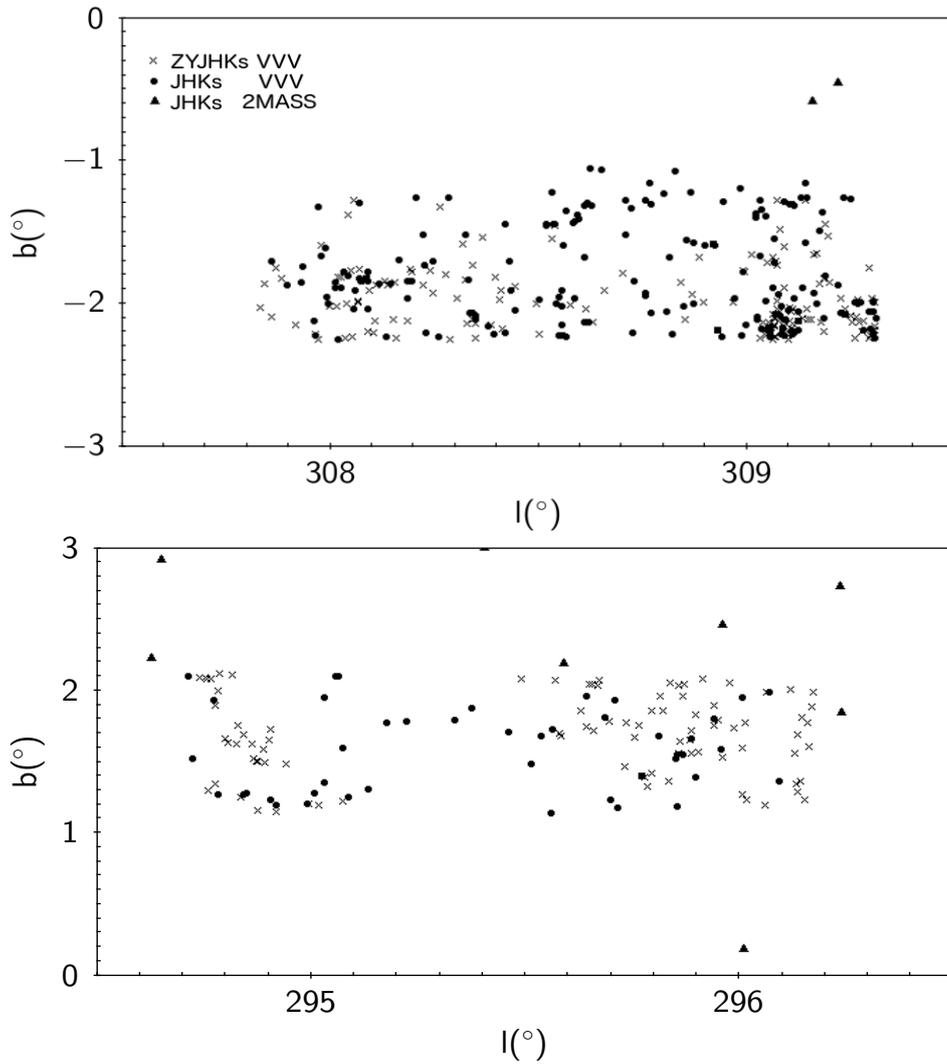


Figura 37: Distribución de los candidatos a fuentes extragalácticas en coordenadas Galácticas. Para el Tile d010 (panel superior) y para el Tile d115 (panel inferior) se representan los candidatos detectados en las 3 bandas (círculos llenos) y en las 5 bandas (cruces), junto con las fuentes extragalácticas del 2MASS (triángulos).

ra confirma la carencia de fuentes extragalácticas previamente estudiadas en estas dos regiones del relevamiento VVV. Sólo se encuentran dos galaxias reportadas en el trabajo de Staveley-Smith y col. (2016) en el relevamiento HIZOA-S, las cuales ya fueron mencionadas en el Capítulo 1, y no fueron incluidas en esta parte del análisis pues ninguna de ellas tienen contraparte en infrarrojo.

En la Tabla 5 se muestran las primeras 10 fuentes del catálogo de candidatos a objetos extragalácticos como ejemplo, mostrando la forma y el contenido del mismo. La Tabla incluye la identificación del objeto (columna 1), las coordenadas J2000 (columnas 2 y 3), las magnitudes PSF Z, Y, J, H y K_s y las magnitudes de apertura en 2 segundos de arco (columnas 4 a 13), y los parámetros morfológicos: $R_{1/2}$, C, elipticidad y el índice de Sérsic (columnas 14 a 17). La columna 18 incluye comentarios acerca de la morfología de los objetos detectados, o si el objeto presenta contaminación debido a la presencia de estrellas brillantes cercanas. Los comentarios se representan mediante los siguientes números: 1. Par de Galaxias; 2. Galaxia tipo tardío; forma elongada; 3. Galaxia tipo tardío: con brazos espirales; 4.

Galaxia de tipo temprano: galaxia elíptica brillante; 5. Estrella cercana a la galaxia. Esta Tabla se encuentra publicada en forma de catálogo on-line y además forma parte del artículo Baravalle y col. (2018).

Tabla 5: Catálogo fotométrico de los candidatos a objetos extragalácticos detectados en los Tiles d010 y d115 del relevamiento VVV.

Id.	RA (J2000)	Dec (J2000)	Z	Y	J	H	K _s	Z _{2''}	Y _{2''}	J _{2''}	H _{2''}	K _{s2''}	R _{1/2}	C	ε	n	Notas
VVV-J114419.03-603025.9	11:44:19.03	-60:30:25.9	15.86	15.85	15.76	15.30	15.02	15.96	15.94	15.77	15.19	15.06	2.46	3.54	0.14	3.97	
VVV-J114428.39-603158.4	11:44:28.39	-60:31:58.4	-	-	17.17	17.00	16.44	-	-	17.14	16.91	16.46	1.03	2.34	0.50	7.38	
VVV-J114431.78-601626.8	11:44:31.78	-60:16:26.8	-	-	16.81	16.34	16.27	-	-	16.82	16.35	16.25	1.25	3.34	0.10	7.18	
VVV-J114433.70-602742.8	11:44:33.70	-60:27:42.8	16.82	16.78	16.63	16.20	16.11	16.83	16.77	16.65	16.13	16.08	1.09	2.56	0.18	4.12	
VVV-J114450.83-603356.9	11:44:50.83	-60:33:56.9	17.18	17.02	16.75	16.22	16.06	17.16	16.97	16.80	16.13	16.05	2.20	3.65	0.43	8.36	
VVV-J114456.52-603249.6	11:44:56.52	-60:32:49.6	-	-	16.56	16.02	15.86	-	-	16.60	15.96	15.89	1.25	2.46	0.35	2.64	
VVV-J114457.91-603958.3	11:44:57.91	-60:39:58.3	17.80	17.76	17.60	17.31	16.43	17.77	17.76	17.57	17.32	16.40	2.51	3.09	0.42	4.90	
VVV-J114458.73-603252.1	11:44:58.73	-60:32:52.1	-	-	16.57	15.83	15.45	-	-	16.61	15.88	15.50	1.23	2.51	0.42	1.99	1
VVV-J114516.94-604110.3	11:45:16.94	-60:41:10.3	17.39	17.05	16.71	16.16	16.09	17.32	17.05	16.73	16.12	16.12	1.02	2.43	0.33	3.74	
VVV-J114520.81-603555.3	11:45:20.81	-60:35:55.3	-	-	16.86	16.3	15.77	-	-	16.78	16.11	15.73	1.34	2.79	0.47	4.49	

Las Figuras 39 y 38 muestran algunos ejemplos de objetos extragalácticos detectados mediante imágenes color combinadas en las bandas J, H, y K_s para el Tile d010 y para el Tile d115, respectivamente. En ambas Figuras, es posible apreciar el color más rojo y la forma más extendida de los objetos extragalácticos respecto al resto de las fuentes presentes en las imágenes. Observando la morfología de los objetos detectados, la mayoría de las fuentes corresponden a objetos esferoidales, en algunos ejemplos es posible identificar la presencia de un bulge central, así como también otros son claros ejemplos de galaxias de tipo tardío.



Figura 38: Imágenes combinadas en las bandas J, H, y K_s de algunos ejemplos de objetos extragalácticos detectados en el Tile d010. Los recuadros en líneas cortadas blancas representan un área de 20×20 segundos de arco. Norte hacia arriba y Este hacia la izquierda.



Figura 39: Imágenes combinadas en las bandas J, H, y K_s de algunos ejemplos de objetos extragalácticos detectados en el Tile d115. Los recuadros en líneas cortadas blancas representan un área de 20×20 segundos de arco. Norte hacia arriba y Este hacia la izquierda.

PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y FOTOMÉTRICAS DE LOS OBJETOS EXTRAGALÁCTICOS

En este Capítulo se analizan las propiedades fotométricas y morfológicas de los objetos extragalácticos detectados en los Tiles d010 y d115 del relevamiento VVV aplicando el algoritmo de identificación propuesto.

La Figura 40 muestra las distribuciones correspondientes a las magnitudes J, H y K_s y al color ($H - K_s$) de los objetos extragalácticos detectados en el Capítulo 3 previamente corregidos por extinción galáctica. En línea continua se representan las distribuciones de los objetos extragalácticos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) y en línea cortada las distribuciones correspondientes a objetos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s). La Figura 41 muestra las distribuciones de los principales parámetros estructurales, a saber, el radio que encierra el 50% del flujo total del objeto $R_{1/2}$, el índice de concentración C, la elipticidad y el índice Sérsic (n , en escala logarítmica).

En la Tabla 6 se muestran las medianas con sus respectivos errores, de las magnitudes PSF y de apertura en las bandas Z, Y, J, H y K_s del relevamiento VVV, junto con los colores y los parámetros estructurales $R_{1/2}$, C, ϵ e índice de Sérsic (n) obtenidos para los objetos extragalácticos detectados en 3 y 5 bandas. De las distribuciones y de la Tabla podemos apreciar que los candidatos a objetos extragalácticos detectados en este trabajo son, en general, pequeños, con índice de concentración entre 2.5 a 3.5; elipticidades que van desde 0.1 a 0.4 y valores del índice de Sérsic entre 1 y 7. Este último índice podría estar asociado principalmente al bulge de las galaxias, con un pico alrededor de 4. Estos resultados sugieren que los objetos detectados son de tipo más temprano.

No tener fuentes extragalácticas detectadas con contraparte en infrarrojo, en los dos Tiles estudiados del relevamiento VVV presenta desventajas si se pretende evaluar los resultados obtenidos. No se pueden realizar comparaciones directas de fuentes extragalácticas con nuestros datos. Sin embargo, podemos comparar las propiedades de los candidatos a objetos extragalácticos detectados en este trabajo con las propiedades de galaxias detectadas en otras regiones detrás del plano de la Vía Láctea, como por ejemplo las galaxias detectadas en HI en los trabajos de Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014) y de Said y col., 2016b.

Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014) obtuvieron elipticidades, magnitudes isofotales, magnitudes totales y colores de 578 galaxias con velocidades alrededor de 6000 km s^{-1} . La fotometría en IR cercano fue corregida por extinción galáctica y por contaminación estelar. La Figura 42 reproduce las distribuciones correspondientes a los colores en NIR de estos autores, cuyos valores medios son: $(J - H) = 0.67$, $(H - K_s) = 0.24$ y $(J - K_s) = 0.91$. Estos autores citan valores medios de las distribuciones de magnitudes como: $J=13.48$, $H=12.79$ y $K_s=12.53$ mag. Comparando estos resultados con las magnitudes y los colores de nuestros objetos extragalácticos, se puede observar un comportamiento similar en cuanto a los colores de am-

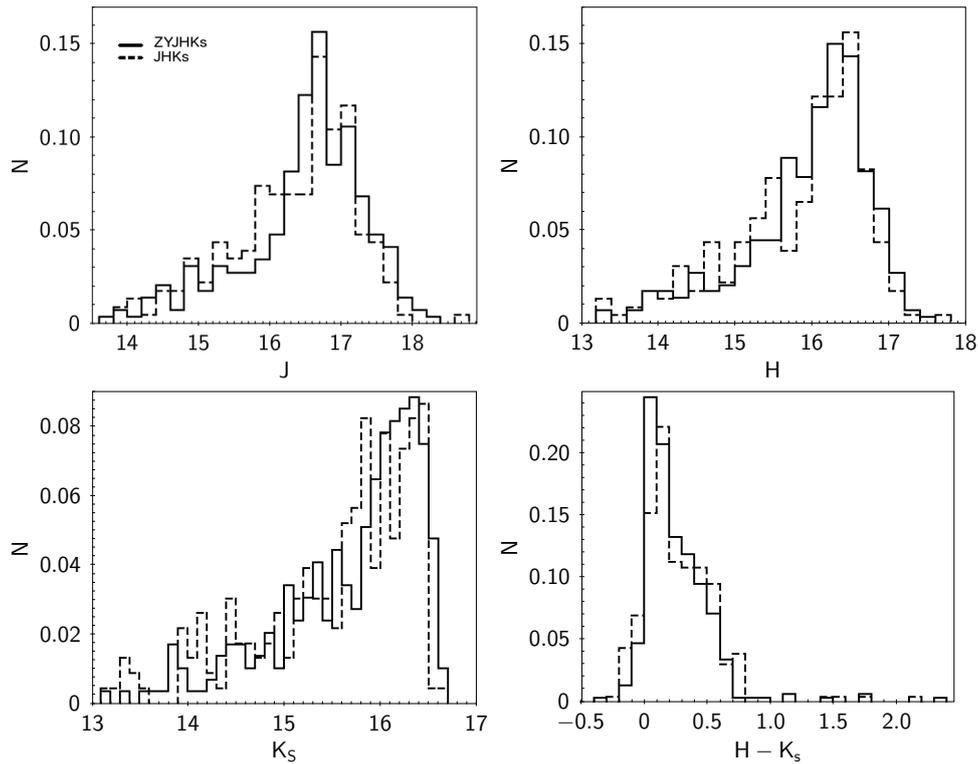


Figura 40: Distribuciones normalizadas de magnitudes J, H y K_s y el color ($H - K_s$) de los candidatos a objetos extragalácticos. Paneles superiores muestran los histogramas de magnitudes J y H, y los paneles inferiores la magnitud K_s y el color ($H - K_s$). Las distribuciones correspondientes a los objetos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) se representan con línea sólida, y con línea cortada se representan las distribuciones correspondientes a aquellos candidatos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s).

Tabla 6: Medianas de magnitudes, colores y parámetros estructurales de las galaxias confirmadas.

Parámetro	Detección JHK _s	Detección ZYJHK _s
Z [mag]	–	17.29 ± 0.06
Y [mag]	–	16.99 ± 0.05
J [mag]	16.51 ± 0.04	16.63 ± 0.05
H [mag]	16.05 ± 0.03	16.16 ± 0.05
K_s [mag]	15.79 ± 0.03	15.94 ± 0.04
(Z - Y) [mag]	–	0.340 ± 0.013
(Y - J) [mag]	–	0.380 ± 0.012
(J - H) [mag]	0.530 ± 0.015	0.540 ± 0.015
(J - K_s) [mag]	0.740 ± 0.024	0.730 ± 0.019
(H - K_s) [mag]	0.260 ± 0.015	0.200 ± 0.015
$R_{1/2}$ [arcsec]	1.31 ± 0.03	1.28 ± 0.04
C	3.13 ± 0.03	2.91 ± 0.03
ϵ	0.370 ± 0.004	0.320 ± 0.008
n	4.60 ± 0.16	4.45 ± 0.13

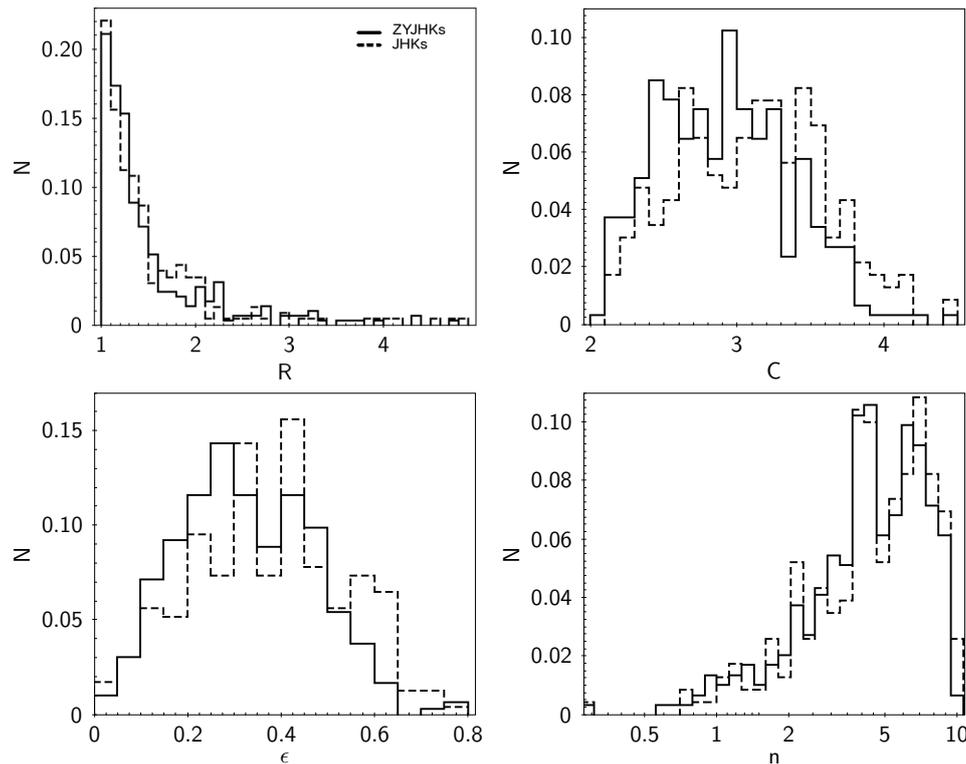


Figura 41: Distribuciones normalizadas de parámetros estructurales de los candidatos a objetos extragalácticos. Paneles superiores muestran histogramas de $R_{1/2}$ y C , y los paneles inferiores histogramas de elipticidad y el índice de Sérsic. Los histogramas están representados de la misma manera que la Figura 40.

bos trabajos y la diferencia más notable se encuentra en las magnitudes. Nuestros objetos detectados son mucho más débiles, llegando a límites de hasta 3 magnitudes más profundo en cada una de las bandas.

Said y col. (2016b) presentan un catálogo fotométrico profundo en infrarrojo cercano (J, H y K_s) de galaxias que también han sido detectadas por el telescopio Parkes HI del relevamiento HIZOA. Ellos muestran que la tasa de detección en función de la densidad estelar y la extinción depende principalmente de la masa de las galaxias en HI, la cual se correlaciona con el brillo en NIR de las galaxias espirales. En este trabajo se presentan distribuciones de algunos parámetros estructurales como el radio que encierra el 50% del flujo total del objeto y la elipticidad. Para este último, ellos encuentran una cantidad similar de objetos con elipticidades entre 0.2 y 0.6. La distribución de elipticidades de nuestros objetos extragalácticos (Figura 41) muestra un ligero aumento de fuentes extragalácticas con detecciones en las 5 bandas para elipticidades menores que 0.3. Por el contrario, hay un aumento para valores de elipticidad más altos en la distribución correspondiente a las detecciones en 3 bandas. Nuestros resultados son diferentes a los reportados por Said y col. (2016b), pues su selección de galaxias en HI favorece la detección de galaxias de tipo tardío. La Figura 43 reproduce algunos ejemplos de las galaxias por ellos estudiadas donde es posible apreciar la morfología de las mismas. Estas galaxias son mayormente de tipo tardío, se observa claramente la estructura espiral y en algunos casos la presencia de discos. Además, observando la distribución de $R_{1/2}$ en la Figura 41, es notable la existencia de un pico para una media de 1.3 segundos de arco, lo que implica que estos objetos son pequeños. La combinación

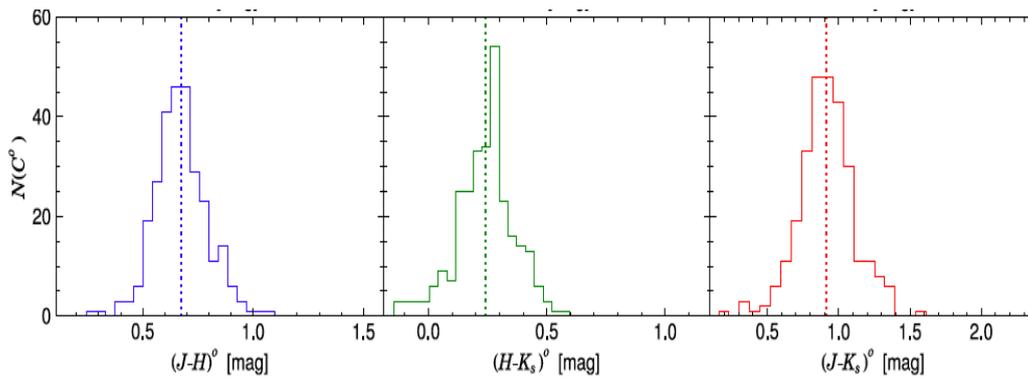


Figura 42: Distribuciones de colores NIR obtenidas por Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014). En el panel izquierdo se muestra la distribución correspondiente al color (J - H) en azul, el panel del medio muestra el color (H - K_s) en verde; y el panel derecho el color (J - K_s) en rojo. Las líneas verticales indican los valores medios de cada distribución.

de los resultados obtenidos para estos dos parámetros muestran que nuestros objetos extragalácticos son pequeños y circulares, esto se debe principalmente a la sensibilidad de IR cercano para seleccionar la población vieja de estrellas en objetos más compactos y en galaxias de tipo temprano, en contraste con las galaxias estudiadas en el relevamiento HIZOA que son de tipo más tardío.

La Figura 44 reproduce imágenes de 24 galaxias de diferente morfología extraídas del trabajo de Hiemer y col. (2014). En este trabajo se presenta el código GALAPAGOS-C (diseñado para procesar gran cantidad de imágenes) aplicado al Relevamiento de Evolución de Galaxias del Telescopio Espacial A901/902 (STAGES; Gray y col., 2009) con el objetivo de investigar la evolución y dependencia de las galaxias con el ambiente. En el panel izquierdo de la Figura, se presenta las galaxias con índice de Sérsic bajo ($0.4 < n < 1.6$), en el panel del medio se presentan las galaxias con índice de Sérsic intermedio ($1.6 < n < 2.5$) y en el panel derecho aquellas galaxias con alto índice de Sérsic ($2.5 < n < 7.0$). Ellos encuentran una dependencia del índice de Sérsic con la densidad de galaxias. Las galaxias con índice de Sérsic bajo ($0.4 < n < 1.6$) se encuentran en ambientes de baja densidad y galaxias con alto índice de Sérsic ($2.5 < n < 7.0$) se encuentran en ambientes de alta densidad. Además, se aclara en la Figura si estas galaxias alojan disco (paneles superiores) y si no lo tienen o su presencia es poco clara (paneles inferiores).

En el rango óptico, la distribución del índice de Sérsic es bimodal, (Kelvin y col., 2012), con picos centrados en 1 y 3.5, los cuales corresponden a galaxias de tipo tardío y temprano, respectivamente. En la Figura 41, la distribución del índice de Sérsic para los objetos extragalácticos detectados en nuestro trabajo muestra un pico en alrededor de 3.5 y otro pico un poco menor en 5. Estos valores sugieren que los objetos extragalácticos detectados son preferentemente galaxias de tipo temprano.

Por otra parte, en el trabajo de Andrews y col. (2014) se analiza una misma región en el cielo observada por 3 relevamientos en infrarrojo cercano: 2MASS, UKIDSS y el VISTA VIKING. Para ello, utilizan SExtractor en imágenes en la banda K_s y comparan la tasa de detección, la fotometría, las mediciones de tamaños

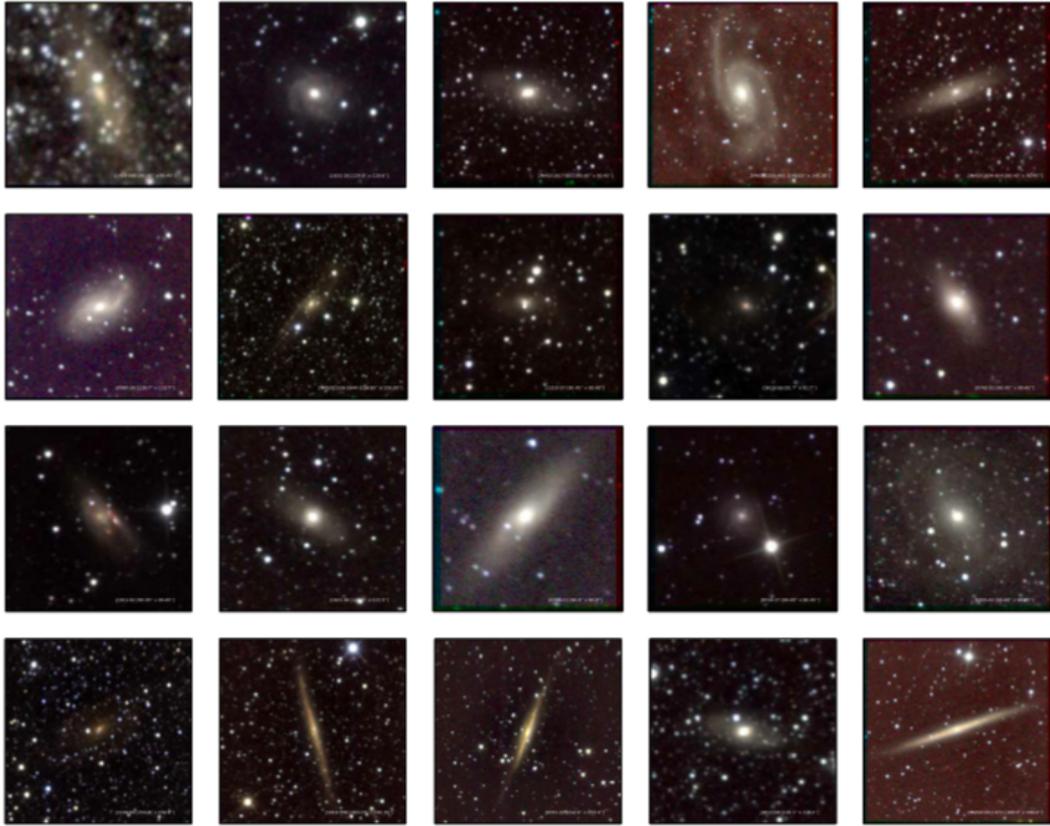


Figura 43: Imágenes a color de ejemplos de galaxias brillantes presentadas en el trabajo de Said y col. (2016b).

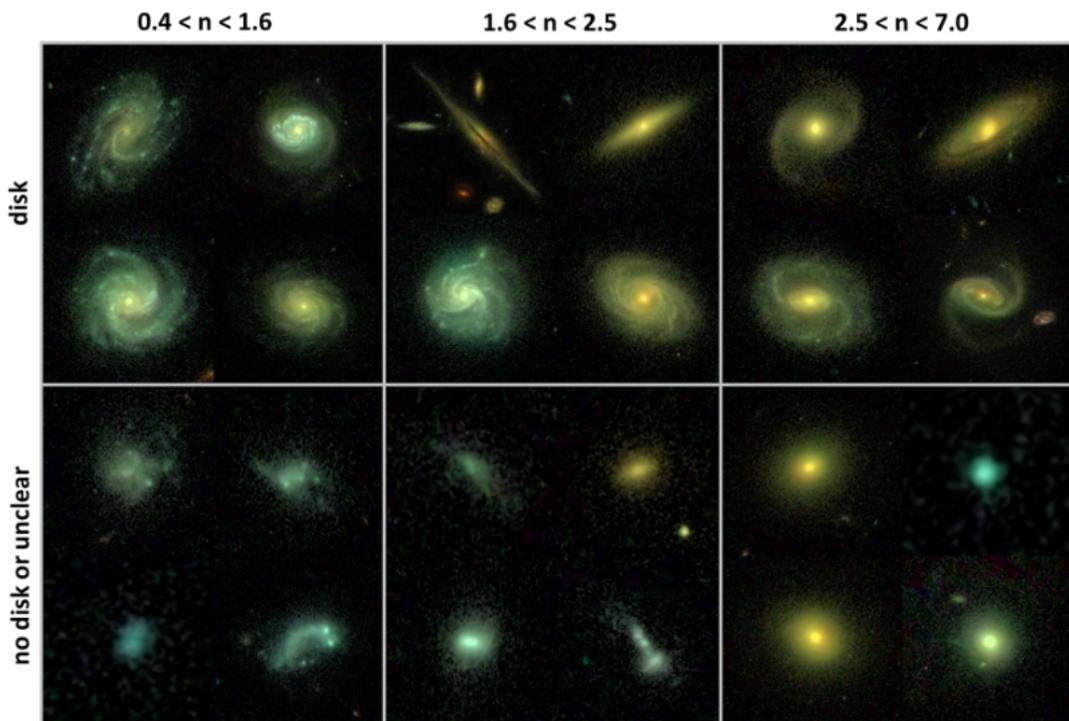


Figura 44: Ejemplo de galaxias que presentan diferentes valores del índice de Sérsic extraídas del trabajo de Hiemer et al. (2014).

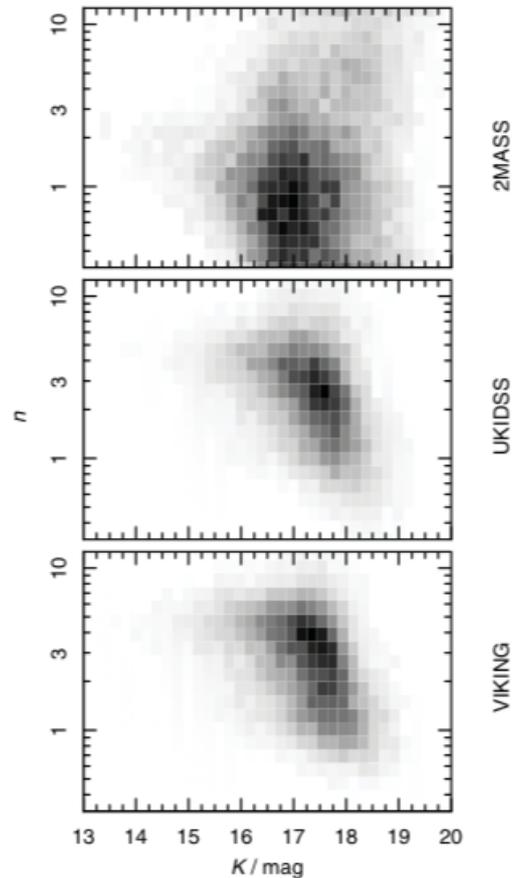


Figura 45: Mapa de densidad de las distribuciones correspondientes al índice de Sérsic en función de la magnitud K_s para galaxias detectadas en los relevamientos 2MASS, UKIDSS y VISTA VIKING extraído de Andrews y col. (2014).

y mediciones estructurales como la elipticidad y el índice de Sérsic de una muestra de 37591 galaxias. Los límites fotométricos que encuentran son de 15.8, 19.4 y 20.6 mag para 2MASS, UKIDSS, y VISTA VIKING respectivamente. Encuentran que el 2MASS detecta un 20% menos de la población de galaxias dentro de todo el rango de magnitud, para las galaxias detectadas, la fotometría es robusta hasta 14.7 mag. En cuanto a los resultados de VISTA VIKING son completos hasta aproximadamente 20.0 mag y las medidas estructurales son robustas hasta 18.8 mag. Es importante mencionar que, aunque cubren diferentes regiones en el cielo, el relevamiento VISTA VIKING utiliza el mismo telescopio y cámara que el relevamiento VVV, por lo que se descartan sesgos en las comparaciones con los resultados obtenidos en este trabajo. La Figura 45 reproduce los mapas de densidad entre los índices de Sérsic y las magnitudes K_s del trabajo de Andrews y col. (2014). Particularmente se observan valores más altos del índice de Sérsic en el rango de magnitud $15 < K_s < 18$ para datos de los relevamientos VISTA VIKING y UKIDSS. En particular el panel del medio que corresponde al índice de Sérsic obtenido para galaxias del relevamiento VISTA VIKING, muestra un pico del índice de Sérsic cercano a 4, resultado similar al encontrado en nuestro trabajo.

Respecto a la distribución correspondiente al índice de concentración, podemos comparar los resultados obtenidos con la Figura 46 extraída del trabajo de Conzelmann, Bershady y Jangren (2000). En esta Figura se reproduce el índice de concen-

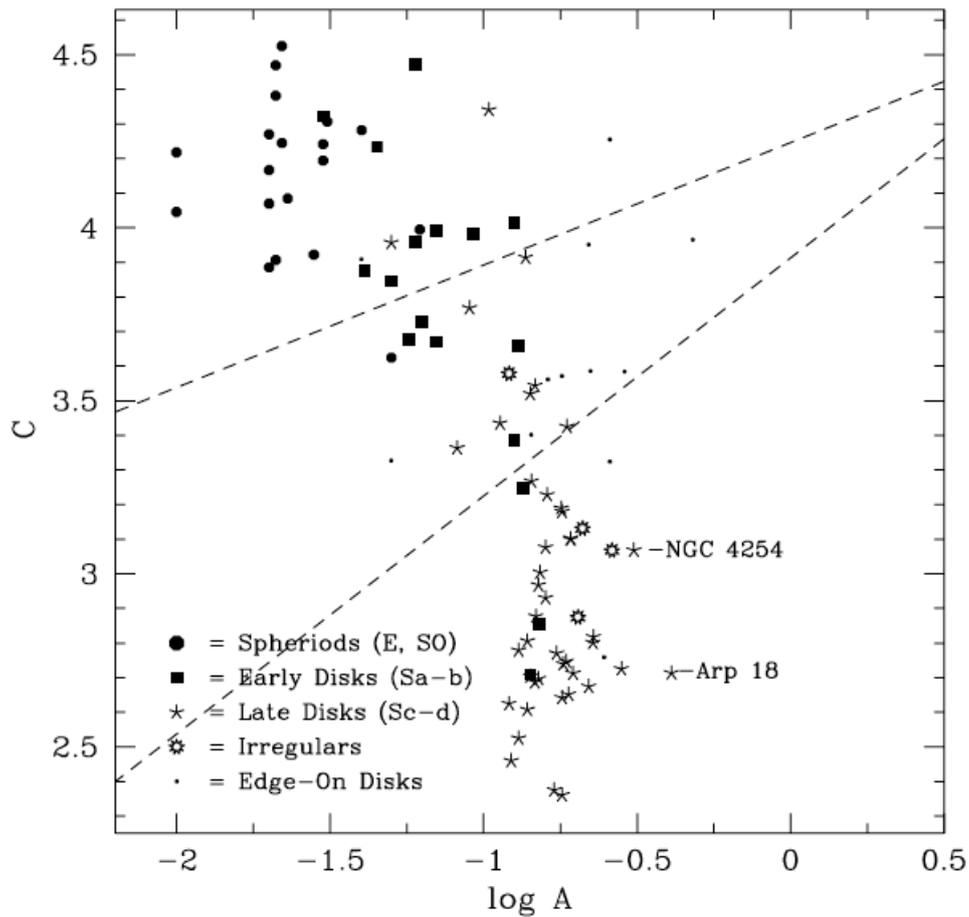


Figura 46: Índice de concentración en función de la asimetría para una muestra de galaxias de distintos tipos morfológicos en el óptico representadas con diversos símbolos. Figura extraída del trabajo de Conselice, Bershady y Jangren (2000).

tración versus la asimetría A , para una muestra de galaxias en las bandas B_J y R que presentan diferentes tipos morfológicos. La asimetría es un parámetro cuantitativo basado en la comparación de la imagen de la fuente con su contraparte rotada. Este parámetro es utilizado comúnmente como un parámetro morfológico (Conselice, 1997). En la Figura, se observa que los objetos más esferoidales son los objetos más simétricos y más concentrados, mientras que los objetos tipo disco están menos concentrados y son más asimétricos. En general, las galaxias elípticas o de tipo temprano presentan valores de $C > 3.5$; mientras que las galaxias tipo disco o galaxias tardías presentan valores de $C < 3.5$. Respecto a la distribución del índice de concentración objetos extragalácticos, en la Figura 41 se observa que los mismos presentan valores de índice de concentración entre 2.5 y 3.5, lo que sugiere que los objetos extragalácticos detectados en nuestro trabajo son objetos de tipo temprano.

El procedimiento fotométrico propuesto en este trabajo de tesis y utilizado para realizar la búsqueda y caracterización de objetos extragalácticos en el VVV (Capítulo 3) junto con los principales resultados obtenidos se encuentran publicados en el Artículo **Searching for Extragalactic Sources in the VISTA Variables in the Vía Láctea Survey** de *L. D. Baravalle, M. V. Alonso, J. L. Nilo Castellón, J. C. Beamín & D. Minniti* en la revista *Astronomical Journal* (Baravalle y col., 2018).

En este Capítulo se pretende utilizar el procedimiento fotométrico desarrollado en esta Tesis para analizar las propiedades fotométricas en el infrarrojo cercano de fuentes de altas energías en regiones del plano Galáctico. En este sentido, se analizan las propiedades fotométricas de uno de los cuatro blazares detectados en el tercer catálogo de Fermi-LAT (3FGL, siglas en inglés de Third Fermi Gamma-ray LAT Catalog, Acero y col., 2015), usando diagramas Color-Color y Color-Magnitud del relevamiento VVV. Además, se comparan los resultados obtenidos con diferentes métodos de detección de blazares basados en observaciones en infrarrojo medio del relevamiento WISE (siglas en inglés de Wide-field Infrared Survey Explorer, Wright y col., 2010).

5.1 FUENTES FERMI ASOCIADAS A BLAZARES

El Telescopio Espacial de Gran Área de Rayos Gamma Fermi ha estado examinando el cielo desde agosto del 2008 (Fermi-LAT, Abdo y col., 2010). La combinación de una gran exposición ha originado imágenes y catálogos profundos, obtenidos en forma uniforme en el rango de energía de 100 MeV a 100 GeV de todo el cielo (Abdo y col., 2010). Las observaciones de fuentes a altas energías son interesantes trazadoras de los procesos más energéticos en el universo, y han sido difíciles de identificar durante mucho tiempo (Ackermann y col., 2012). Los catálogos logrados con Fermi-LAT son de gran utilidad para caracterizar emisores de rayos gamma. En el catálogo 3FGL (Acero y col., 2015) se han detectado un total de 3033 fuentes de alta energía en rayos gamma en el cielo. Luego de correlacionarse con otros catálogos de fuentes conocidas que emiten rayos gamma, encontraron que 1009 fuentes del total no presentan contraparte en otras longitudes de onda. El trabajo de Ackermann y col. (2012) plantea que la dificultad de encontrar contrapartes a estas fuentes de alta energía se debe al gran error en la determinación de sus posiciones. En este trabajo, los autores emplean un análisis estadístico de las características principales de rayos gamma para aquellas fuentes que no están asociadas en otras longitudes de onda, en un esfuerzo por correlacionar sus propiedades en rayos gamma con los núcleos galácticos activos, AGN.

La Figura 47, extraída del trabajo Acero y col. (2015) muestra diferentes fuentes catalogadas por Fermi-LAT cubriendo todo el cielo, como pulsares, estrellas binarias, regiones de formación estelar, galaxias en general, galaxias con núcleo activo (AGN), entre otras. Se identifican también aquellas detecciones que no tienen fuentes asociadas. La Figura 48 muestra las fuentes detectadas en el plano de la Vía Láctea.

Los blazares son un tipo particular de galaxias con núcleo activo, caracterizados por presentar emisión intensa y variable a lo largo de todo el espectro electromagnético, desde radio hasta rayos gamma, por lo que se consideran fuentes extremas y de gran alcance energético. Sus características observacionales incluyen una alta

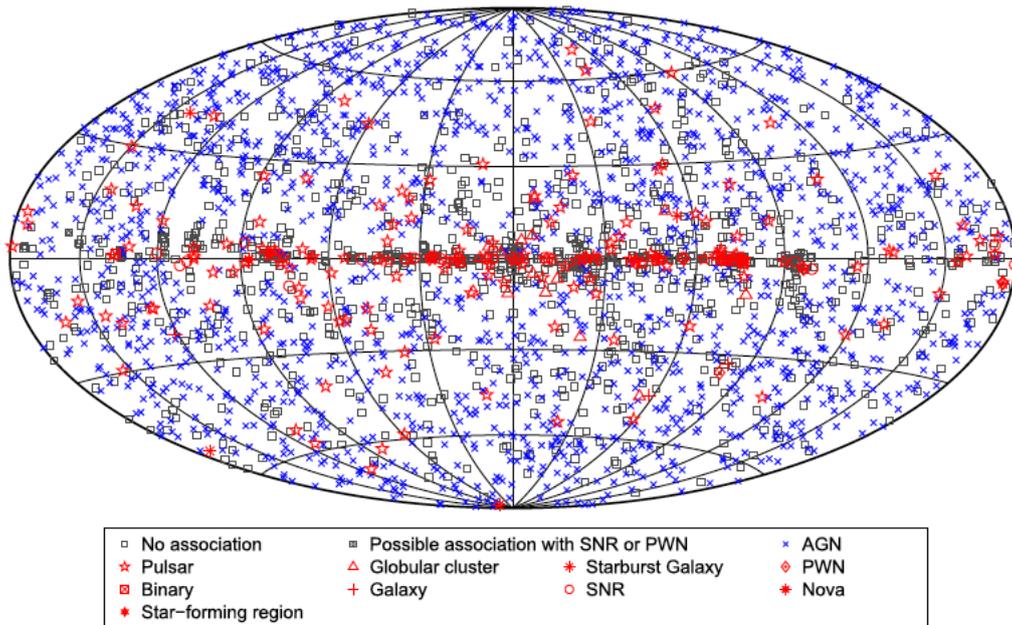


Figura 47: Mapa del cielo completo en coordenadas galácticas mostrando los diferentes tipos de fuentes catalogadas por Fermi-LAT extraída del trabajo de Acero y col. (2015).

y variable polarización, altas luminosidades junto con un espectro en radio plano que se agudiza en las bandas del óptico e IR, y una rápida variabilidad en rayos X con líneas de emisión muy débiles o ausentes (Massaro y col., 2011). La distribución espectral de energía de estos objetos está dominada por emisión no térmica: sincrotrón a bajas frecuencias y emisión Compton inversa a altas frecuencias (Ghisellini, Maraschi y Treves, 1985). Estas fuentes deben su comportamiento físico extremo a la presencia de un chorro relativista alineado con la dirección del observador (Blandford y Rees, 1978). Este modelo es el que mejor explica la mayoría de las propiedades peculiares de estas fuentes como la gran y rápida variabilidad de la amplitud del flujo. Los blazares se dividen en diferentes subclases, según cual sea la forma de su espectro óptico: los objetos FSRQ (por las siglas en inglés de Flat Spectrum Radio Quasar) son blazares que presentan espectros dominados por líneas de emisión; y los objetos BL Lac son blazares que presentan líneas de emisión muy débiles o un espectro completamente dominado por el continuo (Falomo, Pian y Treves, 2014).

Utilizando datos del relevamiento WISE en cuatro diferentes longitudes de onda, en el infrarrojo medio, centradas en 3.4, 4.6, 12, y 22 μm , Massaro y col. (2011, 2012) proponen un nuevo método de asociación para la búsqueda de blazares como contraparte de fuentes de rayos gamma. Aplican este método para estudiar las propiedades en infrarrojo y en rayos gamma de una muestra de candidatos a blazares detectada por WISE y por Fermi-LAT. Los autores muestran que en los diagramas Color-Color en las bandas [3.4] - [4.6] - [12] μm , los blazares se encuentran en una región distinta con respecto a las otras fuentes extragalácticas, que se denomina "WBS" (siglas en inglés de WISE blazar strip, D'Abrusco y col., 2012). La ubicación de los blazares en regiones diferentes del diagrama Color-Color, se debe al hecho de que estos objetos están dominados por la emisión no térmica, mientras que las demás fuentes extragalácticas están dominadas por radiación térmica

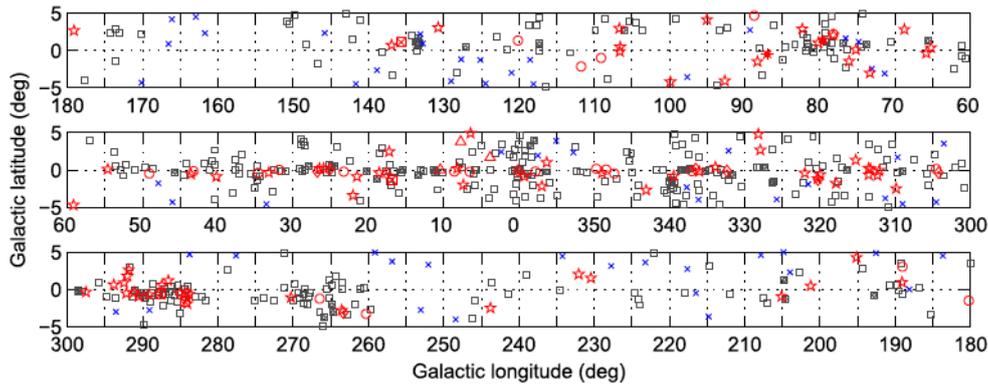


Figura 48: Mapa de la región del plano galáctico mostrando los diferentes tipos de fuentes catalogadas por Fermi-LAT extraída del trabajo de Acero y col. (2015).

en el IR.

5.1.1 Blazares en el relevamiento VVV

El catálogo de blazares Roma-BZCAT¹ (Massaro y col., 2009) es el principal catálogo para identificar contrapartes de fuentes de altas energías. En las regiones del relevamiento VVV, existen sólo 4 blazares del catálogo de Roma-BZCAT localizados a bajas latitudes galácticas. Estos cuatro blazares son objetos también catalogados en el catálogo 3FGL, siendo uno de ellos un objeto FSRQ, otro un objeto BL Lac, y los dos restantes corresponden a blazares de tipo no identificado. La Tabla 7 presenta las principales características de estos 4 blazares. La primera columna muestra la identificación del objeto; segunda y tercera columnas, las coordenadas; cuarta columna corresponde al tipo de objeto, la quinta menciona al Tile del relevamiento VVV donde se encuentra el objeto; y la sexta columna esta relacionada con la apariencia del objeto cuando se lo observa en la imagen combinada.

En la Figura 49 es posible observar la ubicación de estos objetos en el área de cobertura del relevamiento VVV, donde se identifica el Tile al que pertenecen cada uno de los blazares. La Figura 50 muestra imágenes en las bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) de $1' \times 1'$ tamaño centradas en los blazares. En el primer panel (de arriba hacia abajo) se muestra la imagen del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940; en el segundo la imagen del blazar BL Lac 5BZQJ1717-3342; en tercer y cuarto panel las imágenes de los blazares de tipo no identificado 5BZQJ1823-3454 y 5BZQJ1731-3003. En esta Figura se puede observar que los objetos FSRQ 5BZQJ1802-3940 y 5BZQJ1823-3454 presentan características visuales correspondientes a la de un objeto estelar, y los otros dos objetos, BL Lac 5BZQJ1717-3342 y 5BZQJ1731-3003 presentan características visuales de objetos extensos.

El objetivo de este análisis es mostrar, en forma preliminar, que con el procedimiento fotométrico desarrollado en este trabajo de tesis se pueden analizar otros tipos de objetos extragalácticos. Es muy importante que los blazares identificados en el catálogo de Roma-BZCAT puedan ser también identificados en el infrarrojo

¹ <http://www.asdc.asi.it/bzcat>

Tabla 7: Blazares del catálogo de Roma-BZCAT en el relevamiento VVV.

Roma Id	ALPHA J200	DELTA J2000	Tipo de objeto	Tile	Apariencia
5BZQJ1717-3342	17:17:36.0	-33:42:08.7	BL Lac	b356	Extenso
5BZQJ1731-3003	17:31:46.9	-30:03:08.9	Blazar tipo no identificado	b360	Extenso
5BZQJ1802-3940	18:02:42.6	-39:40:07.8	FSRQ	b216	Estelar
5BZQJ1823-3454	18:23:38.6	-34:54:11.9	Blazar tipo no identificado	b206	Estelar

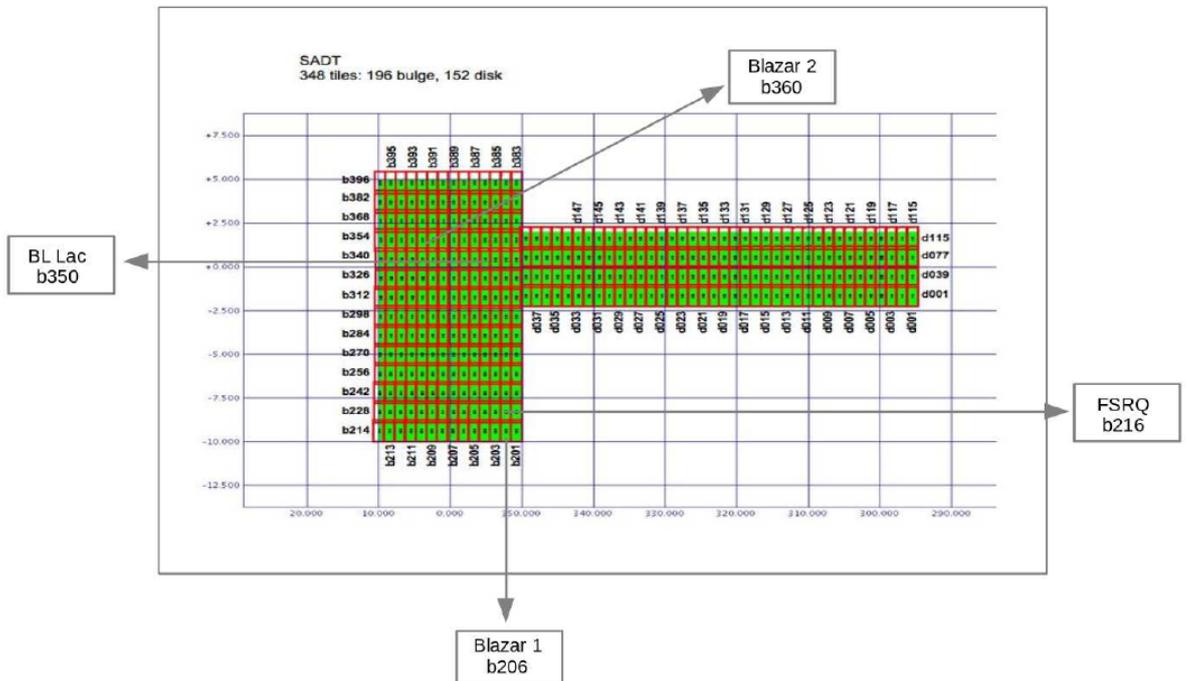


Figura 49: Esquema del área de cobertura del relevamiento VVV en el cual se indica la ubicación de los 4 blazares del catálogo de Roma BZCAT.

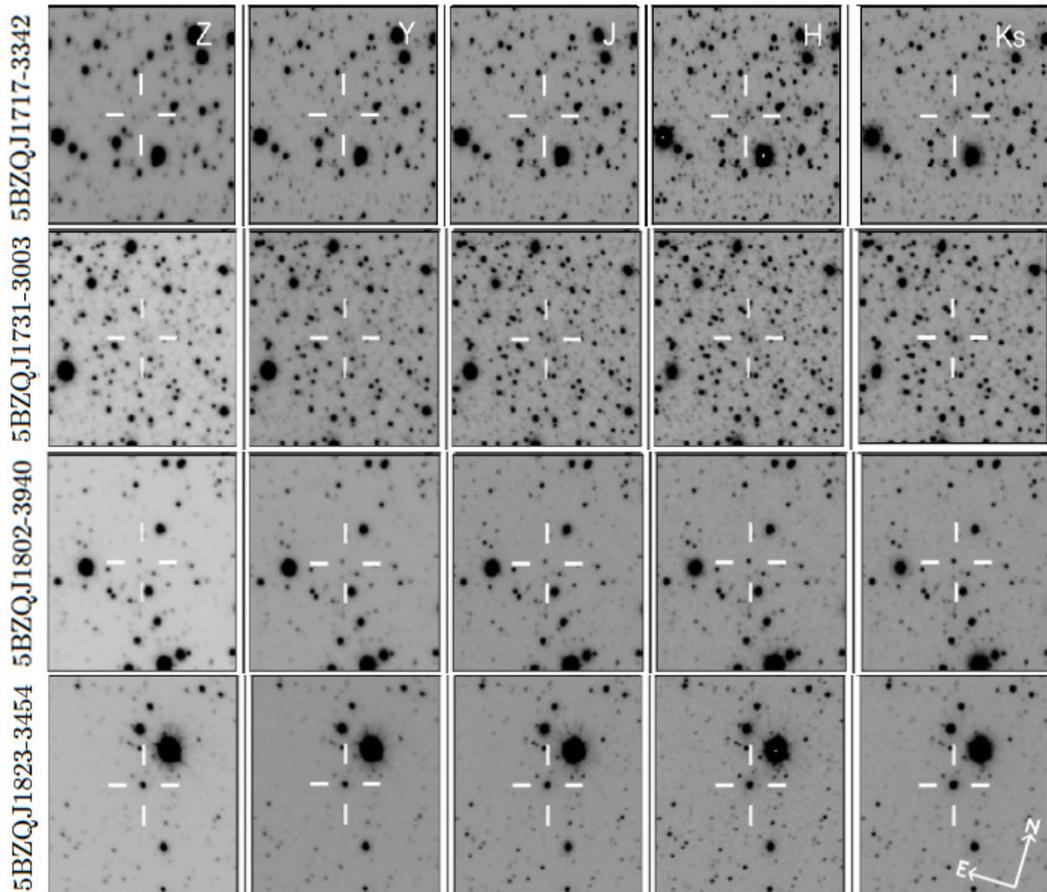


Figura 50: Imágenes $1' \times 1'$ de los 4 blazares en las 5 bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) del relevamiento VVV. Primer panel (de arriba hacia abajo) muestra la imagen del blazar BL Lac 5BZQJ1717-3342; segundo panel el blazar 5BZQJ1731-3003; tercer y cuarto panel imágenes de los blazares FSRQ 5BZQJ1802-3940 y 5BZQJ1823-3454, respectivamente. Norte hacia arriba y Este a la izquierda.

Tabla 8: Parámetros fotométricos de las imágenes correspondientes al Tile b216 utilizados para ejecutar SExtractor+PSFEx

Tile b216	Banda Z	Banda Y	Banda J	Banda H	Banda K _s
Tiempo de exposición [seg]	10	10	6	4	4
Seeing [seg. de arco]	1.11	1.07	0.93	0.96	0.89
Magnitud punto cero [mag]	23.78	23.43	23.79	23.89	23.03
Corrección por apertura [mag]	0.50	0.47	0.33	0.31	0.23

ya que pueden describirse mejor las propiedades de los mismos. En este sentido se presenta aquí solamente el análisis de las propiedades en infrarrojo cercano utilizando los datos del relevamiento VVV y del infrarrojo medio utilizando los datos de WISE del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940.

Para ello, se seleccionaron imágenes de 3×3 minutos de arco de lado en las 5 bandas Z, Y, J, H y K_s del relevamiento VVV centradas en el objeto FSRQ 5BZQJ1802-3940. Para la detección de las fuentes que se encuentran en la región del blazar se ejecutó SExtractor+PSFEx sobre las imágenes en cada una de las bandas tal como se describe en el Capítulo 2. En la Tabla 8 se presentan los valores fotométricos de las imágenes en las diferentes bandas del Tile b216 utilizados para ejecutar SExtractor + PSFEx. En la primera columna se detallan los siguientes parámetros: tiempo de exposición, seeing, magnitud punto cero y la corrección por apertura, de la segunda a la sexta columna se especifican los valores de estos parámetros correspondientes a cada longitud de onda (Z, Y, J, H y K_s).

Se correlacionaron las fuentes de los catálogos en las 5 bandas con una distancia radial de 0.1 segundos de arco, obteniendo de esta manera un catálogo con propiedades fotométricas y morfológicas de las fuentes detectadas en la región del blazar FSRQ J1802.6-3940. De esta correlación los parámetros obtenidos para el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 son: $CLASS_STAR=0.99$ y $\Phi=-0.0003$, las magnitudes totales en las bandas Z, Y, J, H y K_s son 17.26, 16.96, 15.82, 16.12 y 15.77 mag respectivamente. Los colores encontrados son $(Y - J) = 0.75$, $(J - H) = 0.70$, $(J - K_s) = 1.04$ y $(H - K_s) = 0.34$ mag. Por último, los valores de los parámetros morfológicos son: $C=2.41$, $R_{1/2}= 0.53$ [arcsec], $\epsilon=0.07$, y el índice de Sérsic $n=9.64$. De esta manera, el blazar presenta características fotométricas que corresponden a las de un objeto de tipo estelar: $CLASS_STAR > 0.9$, $\Phi < 0.003$ y $R_{1/2} < 0.53$ arcsec. Los valores de estos dos parámetros están de acuerdo a los valores obtenidos para fuentes estelares en los trabajos de Annunziatella y col. (2013) y Desai y col. (2012) discutidos en la sección 3.1 del Capítulo 3.

La Figura 51 presenta los diagramas Color-Magnitud y Color-Color de todos los objetos detectados en la región del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940, representados por cuadrados negros. El blazar se identifica con un círculo lleno negro. Se observa en la Figura que el blazar presenta colores: $(J - K_s) > 1$ y $(Y - J) > 0.5$, bien diferentes de los objetos detectados en la región del blazar. Estos resultados concuerdan con la ubicación característica para este tipo de objetos en los diagramas Color-Magnitud y Color-Color como, por ejemplo, en el trabajo de Cioni y col. (2013). Usando observaciones del relevamiento VMC, los autores logran identificar candidatos a cuásares en el diagrama $(Y - J)$ versus $(J - K_s)$ como fuentes puntuales.

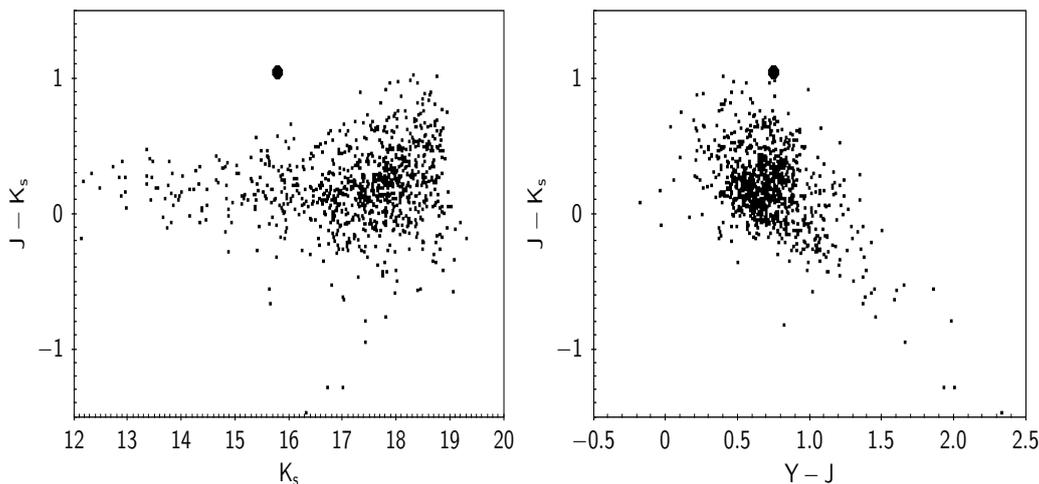


Figura 51: Diagramas Color-Magnitud (panel izquierdo) y Color-Color (panel derecho) de todos los objetos detectados en la región del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 representados por círculos negros. El blazar se identifica mediante un círculo negro de mayor tamaño.

Es interesante comparar nuestros resultados con los de estos autores, ya que VMC es otro relevamiento llevado a cabo utilizando el telescopio VISTA y la cámara VIR-CAM (sección 1.1 del Capítulo 1). La Figura 52 muestra un diagrama Color-Color extraído del trabajo de Cioni y col. (2013), en la misma es posible observar que los candidatos a cuásares ocupan diferentes regiones en este diagrama, separándose de las estrellas de la Vía Láctea y de las Nubes de Magallanes. Los candidatos a cuásares se encuentran en la región limitada por las siguientes líneas: $(J - K_s) = -1.25 \times (Y - J) + 1.05$, $(J - K_s) = 2.05 \times (Y - J) - 0.15$ y $(J - K_s) = -1.25 \times (Y - J) + 1.90$.

Para garantizar la calidad de las detecciones de SExtractor+PSFEx en la región del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940, se llevo a cabo la inspección visual de las imágenes en las diferentes bandas, como también de la imagen combinada en las bandas K_s , H y J. En la Figura 53 se presenta la imagen combinada de una región $3' \times 3'$ de tamaño con el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 en el centro de la misma. En esta imagen además, se superponen datos públicos obtenidos en la NED² (siglas en inglés de NASA/IPAC Extragalactic Database). Aquí se identifica al blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 como un objeto de tipo cuásar (QSO, siglas en inglés de quasi stellar radio source), reportando una velocidad radial de 88739 km/s y redshift de 0.296 (Liang y Liu, 2003). Se identifica también la fuente de rayos gamma a una distancia de aproximadamente $1' 30''$ en ascensión recta, y $8''$ en declinación del QSO. En la imagen es posible apreciar que el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 (QSO) tiene apariencia de un objeto tipo estelar, el mismo muestra además un color más rojo comparado con el resto de los objetos que se encuentran en la imagen.

El error en la detección de la Fuente FERMI de rayos gamma es de 0.0137 grados, es por esto que hay 5 fuentes WISE en esta región, y una de ellas fue encontrada como contraparte del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940. La Figura 54 presenta el diagrama Color-Color usando observaciones en las bandas 3.4, 4.6, 12 y $22 \mu\text{m}$ de WISE. Es posible observar en la Figura la región "WBG" que se ha descrito previamente. Esta región es diferente para los objetos BL Lac (representada en color

² <https://ned.ipac.caltech.edu>

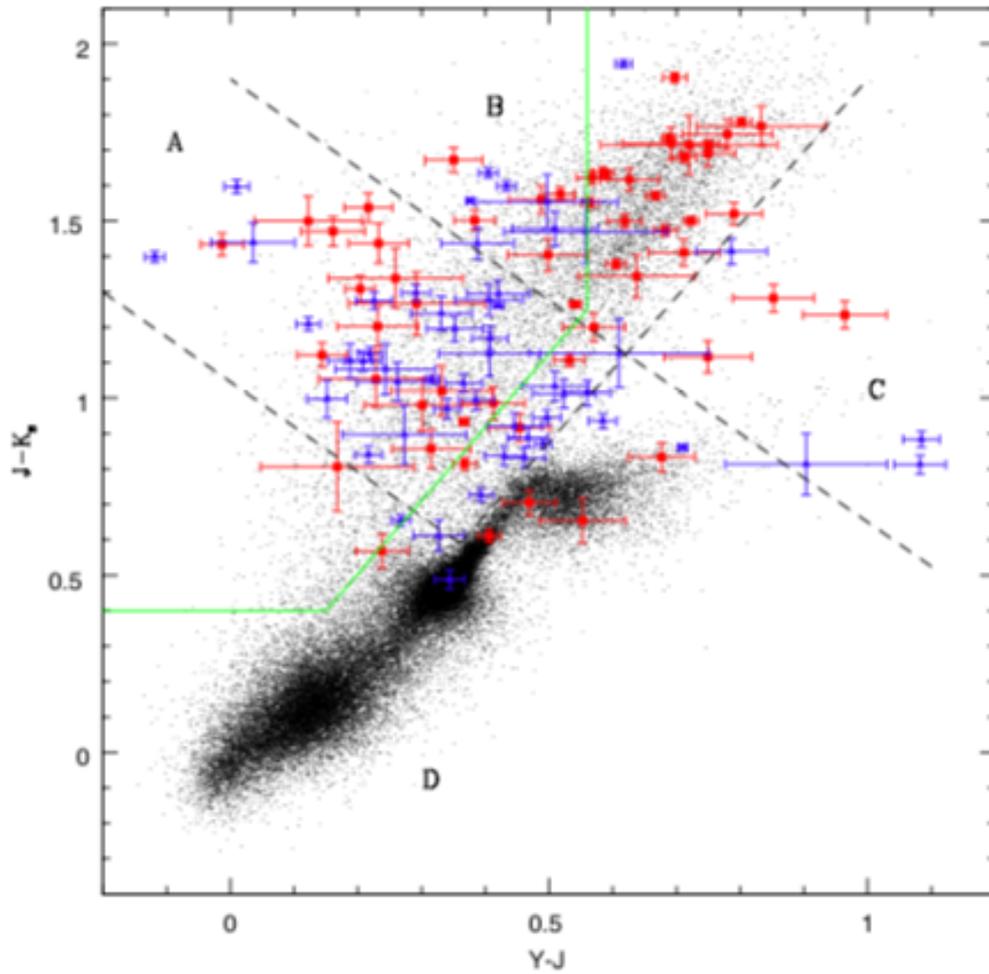


Figura 52: Diagrama Color-Color utilizando datos del relevamiento VMC extraído del trabajo de Cioni y col. (2013). En el diagrama se representan estrellas de la Gran Nube de Magallanes con círculos llenos de color negro, a los cuásares clasificados como galaxia en cuadros llenos rojos y a los cuásares de tipo estelar mediante triángulos llenos azules. Las líneas cortadas negras dividen a las regiones donde se encuentran los cuásares.

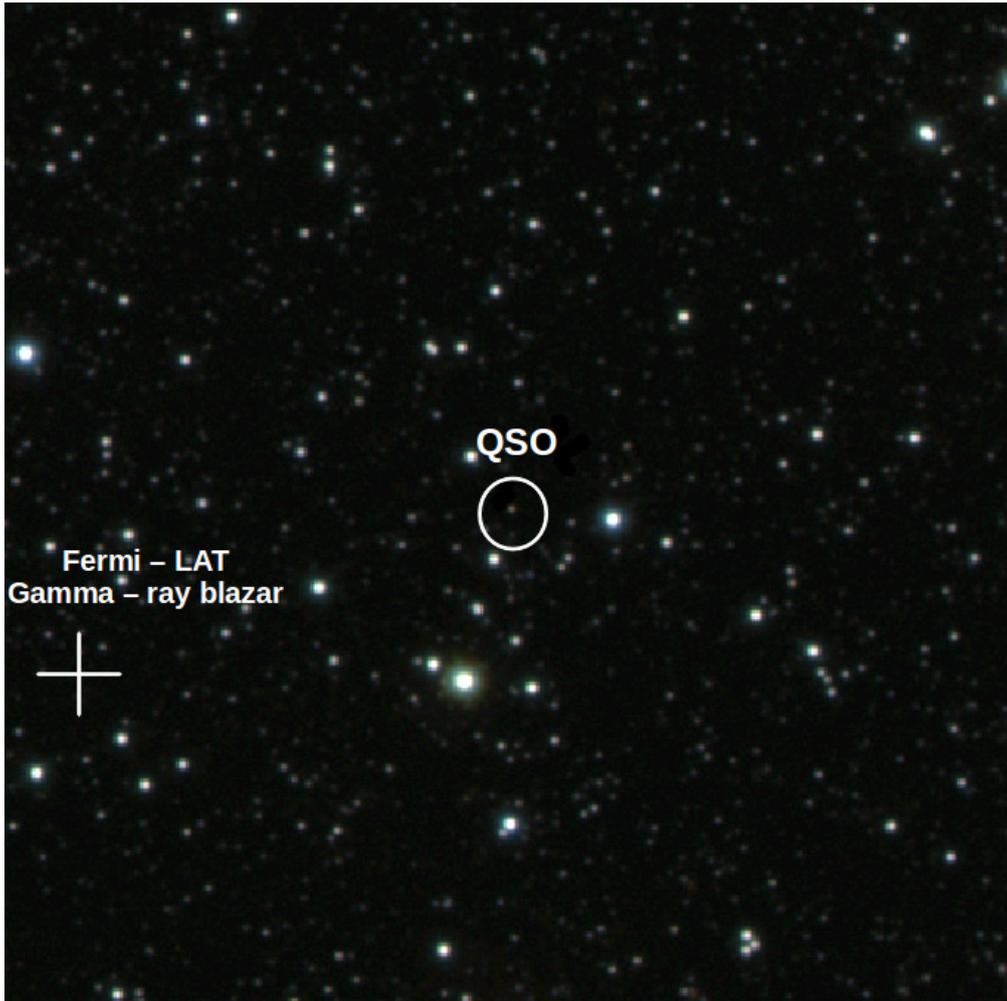


Figura 53: Imagen combinada ($3' \times 3'$) de la región del objeto FSRQ 5BZQJ1802-3940. El QSO (FSRQ 5BZQJ1802-39409) y la fuente de rayos gamma están representados en color blanco por un círculo y una cruz, respectivamente.

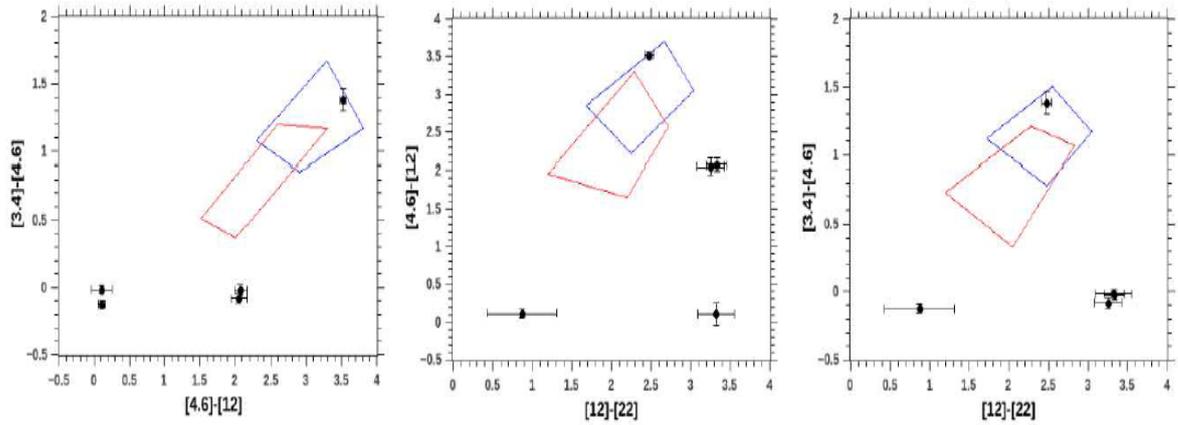


Figura 54: Diagrama Color-Color para el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940. Hay 5 fuentes WISE detectadas, representadas mediante círculos llenos negros, en la región de error de la fuente de rayos gamma y una fuente WISE fue encontrada como contraparte del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940.

rojo) y para los objetos FSRQ (representada en color azul). Para el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940, hay una fuente WISE cumple los requisitos del método WSG para ser una fuente de emisión no térmica.

Parte de este trabajo ha sido publicado en el artículo **Low galactic HE gamma-ray blazars in the VVV survey** de *A. Pichel, L. D. Baravalle, M. V. Alonso, A. Rovero & D. Minniti* en la revista AAA Workshop Series 8, como parte del Quinto Workshop: Energy Phenomena in Relativistic Outflows, 2015.

UN CANDIDATO A CÚMULO DE GALAXIAS EN EL RELEVAMIENTO VVV

6.1 TILE D015

La principal motivación para estudiar el Tile d015 fue el descubrimiento visual de una concentración de objetos rojos que podría pertenecer a un cúmulo de galaxias, como se ha mencionado en la sección 1.3.3 del Capítulo 1.

Se ha aplicado entonces el procedimiento presentado en este trabajo de tesis en el Tile d015, prestando particular atención en la región donde se encuentra esta concentración de objetos rojos. Para ello, se ejecutó SExtractor+PSFEx en las imágenes Z, Y, J, H y K_s correspondientes al Tile d015. En la Tabla 9 se presentan los valores fotométricos de las imágenes en las diferentes bandas del Tile d015 que fueron utilizados para ejecutarlo. En la primera columna se detallan los siguientes parámetros: tiempo de exposición, seeing, magnitud punto cero y la corrección por apertura, de la segunda a la sexta columna se especifican los valores de estos parámetros correspondientes a cada longitud de onda (Z, Y, J, H y K_s). A partir de los catálogos de salida de SExtractor+PSFEx para cada una de las bandas, se correlacionaron las fuentes con una distancia radial proyectada de 0.1 segundos de arco, detectando un total de 746588 fuentes en 3 bandas y 527565 en 5 bandas.

Haciendo uso del procedimiento fotométrico desarrollado en el Capítulo 2 se aplicaron los criterios morfológicos para separar a los objetos extragalácticos del resto de las fuentes: $CLASS_STAR < 0.3$; $1.0 < R_{1/2} < 5.0 \text{ arcsec}$; $2.1 < C < 5$; y $\Phi > 0.002$, como también los cortes en colores: $0.5 < (J - K_s) < 2.0 \text{ mag.}$; $0.0 < (J - H) < 1.0 \text{ mag.}$; $0.0 < (H - K_s) < 1.0 \text{ mag.}$ y además, $(J - H) + 0.9 (H - K_s) > 0.44 \text{ mag.}$ Se clasificaron un total de 933 candidatos a fuentes extragalácticas, de las cuales 408 fuentes tienen detección sólo en 3 bandas (J, H, K_s) y 525 en las 5 bandas (Z, Y, J, H, K_s). Éstas últimas presentan además los colores: $-0.3 < (Y - J) < 1.0 \text{ mag.}$ y $0.3 < (Z - Y) < 1.0 \text{ mag.}$, que deben satisfacer los objetos extragalácticos como fue definido en la sección 3.2 del Capítulo 3. Todas las fuentes extragalácticas fueron corregidas por extinción galáctica utilizando los mapas de Schlafly y Finkbeiner (2011) y los coeficientes relativos de extinción de Catelan y col. (2011), como se explica en detalle en el Capítulo 3. De esta manera se obtuvo un catálogo que incluye coordenadas J2000, las magnitudes PSF y de apertura circular en 2 segundos de arco en las bandas Z, Y, J, H y K_s , $R_{1/2}$, C, elipticidad e índice de Sérsic para todos los candidatos a objetos extragalácticos del Tile d015.

Como se ha mencionado en la sección 3.3 del Capítulo 3, la inspección visual se considera como un límite de confiabilidad del procedimiento adoptado para detectar fuentes extragalácticas, es por esta razón que se han inspeccionado visualmente todos los objetos extragalácticos detectados en este Tile. A partir de la inspección visual, se encontró además, la presencia de algunas fuentes extragalácticas contaminadas por estrellas cercanas, al igual que en los Tiles d010 y d115. Aclaramos que el proceso de descontaminación en este Tile fue aplicado solamente a aquellas

Tabla 9: Parámetros fotométricos de las imágenes correspondientes al Tile d015 utilizados para ejecutar SExtractor+PSFEx .

Tile d015	Banda Z	Banda Y	Banda J	Banda H	Banda K _s
Tiempo de exposición [seg]	20	20	10	10	10
Seeing [seg. de arco]	1.22	1.07	1	0.91	0.98
Magnitud punto cero [mag]	23.91	23.55	23.76	23.92	23.09
Corrección por apertura [mag]	0.40	0.38	0.30	0.23	0.18

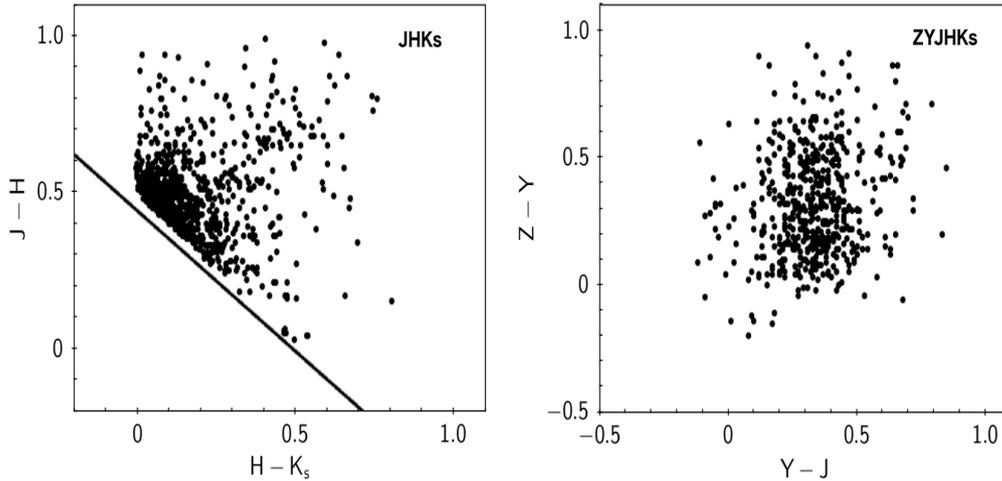


Figura 55: Diagrama Color-Color de las fuentes extragalácticas detectadas en el Tile d015. Panel izquierdo: $(H - K_s)$ versus $(J - H)$ de los objetos extragalácticos detectados simultáneamente en 3 bandas (J, H y K_s). En línea sólida se representa la recta $(J - H) + 0.9(H - K_s) = 0.44$ mag utilizada para eliminar falsas detecciones. Panel derecho: $(Y - J)$ versus $(Z - Y)$ de los objetos que tienen detección simultáneamente en las 5 bandas del relevamiento VVV.

fuentes contaminadas que se encuentran en la región de la concentración de objetos rojos.

La Figura 55 muestra los diagramas Color-Color de las fuentes extragalácticas detectadas en el Tile d015. En el panel izquierdo se observan los colores $(H - K_s)$ versus $(J - H)$ para aquellas fuentes extragalácticas detectadas simultáneamente en 3 bandas (J, H y K_s). La línea sólida representa la recta $(J - H) + 0.9(H - K_s) > 0.44$ mag la cual se ha utilizado para eliminar falsas detecciones, como estrellas dobles o asociaciones de estrellas (explicada en el Capítulo 3). En el panel derecho se presentan los colores $(Y - J)$ versus $(Z - Y)$ de los objetos que han sido detectados simultáneamente en las 5 bandas del relevamiento. Se observa en la Figura que los objetos extragalácticos en este Tile se mantienen dentro de las regiones definidas previamente y están de acuerdo con la Figura 34 y la Figura 35 correspondientes a los Tiles d010 y d115.

Con respecto a las características fotométricas y estructurales de los objetos extragalácticos detectados, la Figura 56 muestra las distribuciones normalizadas de los parámetros fotométricos como las magnitudes J y H en los paneles superiores, y en los paneles inferiores la magnitud K_s y el color $(J - K_s)$. La Figura 57 muestra las distribuciones normalizadas de los parámetros morfológicos como el radio que encierra el 50% del flujo total del objeto ($R_{1/2}$), y el índice de concentración

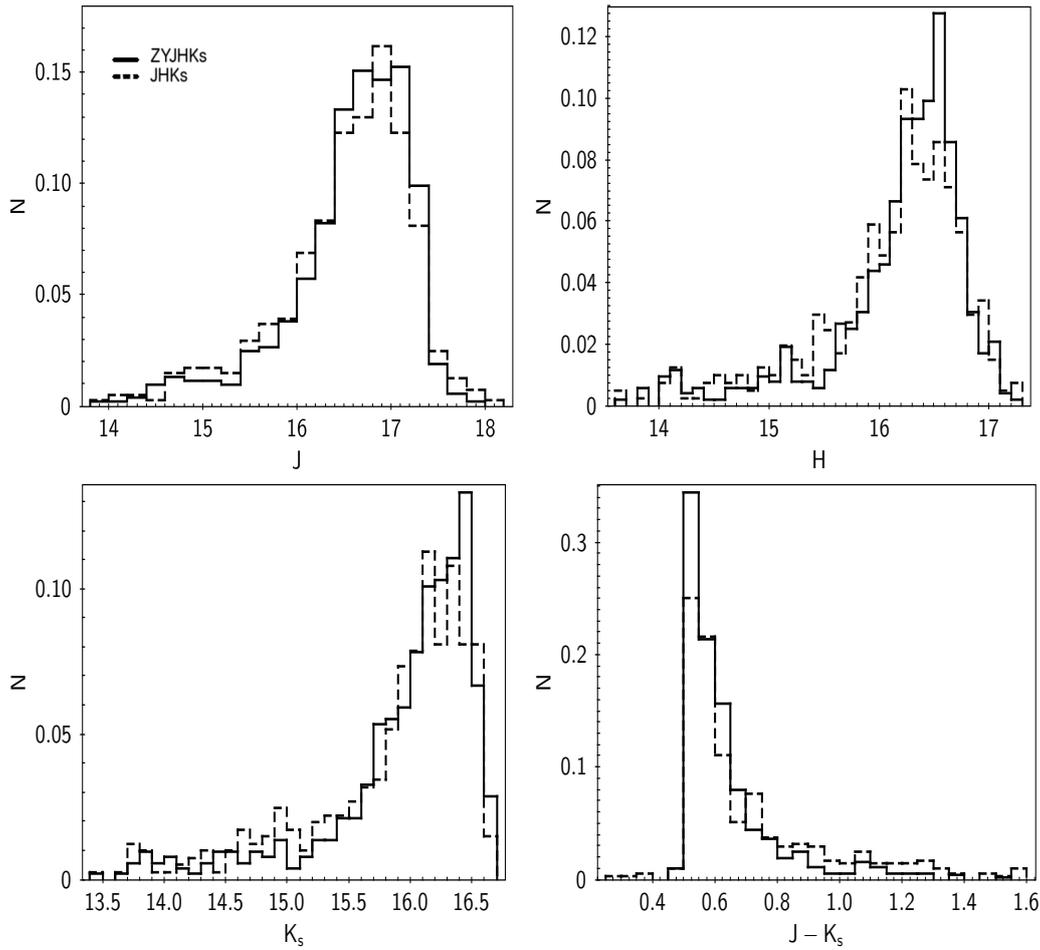


Figura 56: Distribuciones normalizadas de parámetros fotométricos de los candidatos a objetos extragalácticos del Tile d015. Paneles superiores muestran histogramas de la magnitud J y H, y los paneles inferiores la magnitud K_s y el color $(J - K_s)$. Las distribuciones correspondientes a los objetos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) se representan con línea sólida, y con línea cortada se representan las distribuciones correspondientes a aquellos candidatos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s).

(C) en los paneles superiores, y en los paneles inferiores las distribuciones de ϵ y el índice de Sérsic, n . En línea continua se representan las distribuciones de los objetos extragalácticos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) y en línea cortada las distribuciones correspondientes a objetos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s). Ambas muestras se comportan de manera similar, a diferencia de la distribución correspondiente a la elipticidad en la que se observan un mayor número de fuentes extragalácticas con detecciones en las 5 bandas para valores de elipticidades menores que 0.3 y un aumento de fuentes para valores de elipticidades más altos en la distribución correspondiente a las detecciones en 3 bandas. Las distribuciones de la Figura reflejan que los objetos extragalácticos detectados en este Tile son pequeños, redondeados y rojos, los cuales pueden asociarse a galaxias de tipo temprano. Estos resultados son similares a las distribuciones presentadas en el Capítulo 4 para los Tiles d010 y d115.

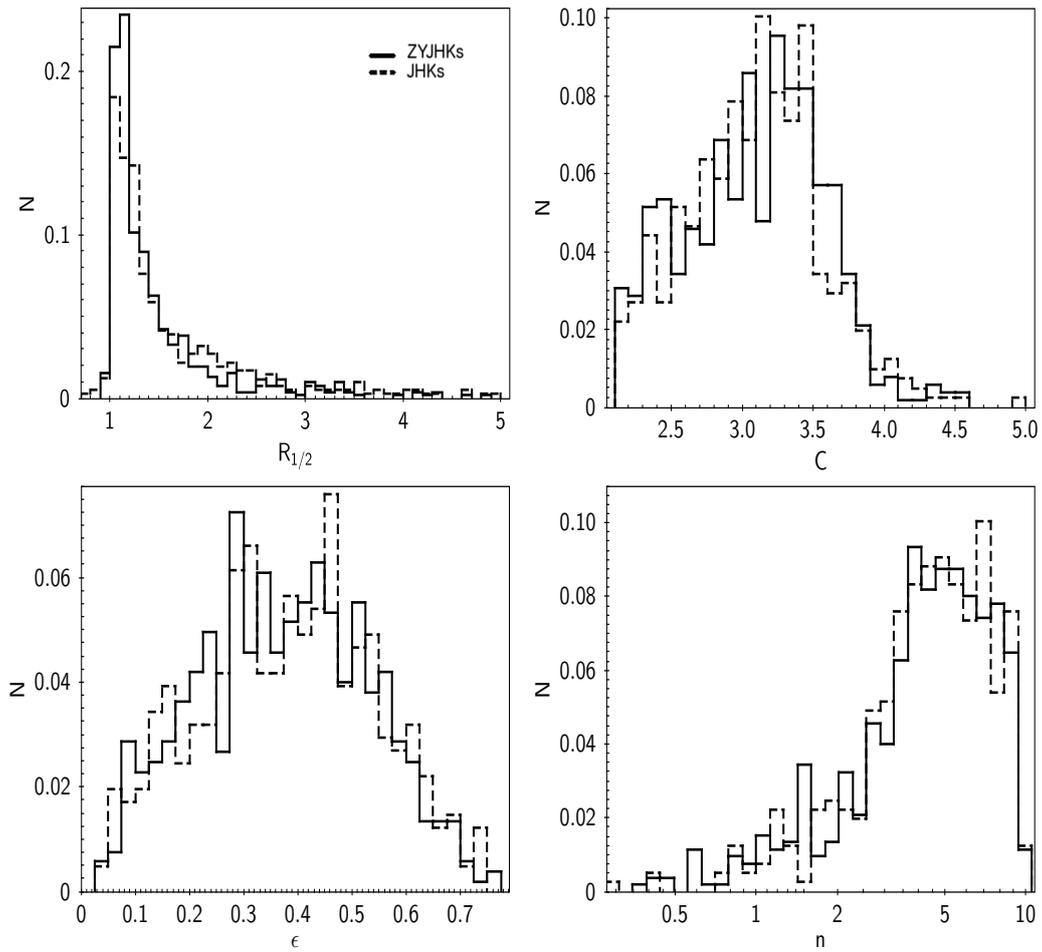


Figura 57: Distribuciones normalizadas de parámetros morfológicos de los candidatos a objetos extragalácticos del Tile d015. Paneles superiores muestran histogramas de $R_{1/2}$ y C , y los paneles inferiores de ϵ y n . Las distribuciones correspondientes a los objetos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) se representan con línea sólida, y con línea cortada se representan las distribuciones correspondientes a aquellos candidatos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s).

6.2 DETECCIÓN DE CÚMULOS DE GALAXIAS

Los cúmulos de galaxias son los mayores sistemas gravitacionalmente ligados del Universo. Estos sistemas poseen una masa típica entre $10^{13}M_{\odot}$ y $10^{15}M_{\odot}$ dentro de un radio de 1.5 Mpc, una dispersión central de velocidades de alrededor de 800 km s^{-1} y una relación masa luminosidad entre $250 M_{\odot}/L_{\odot}$ y $400 M_{\odot}/L_{\odot}$ (Binney & Tremaine 1987). Desde del punto de vista observacional, existe una clara correlación entre el tipo morfológico y la densidad local de galaxias (Dressler, 1980), al igual que una dependencia del tipo morfológico con la distancia al centro del cúmulo (Whitmore, Gilmore y Jones, 1993). La distribución de galaxias dentro de un cúmulo depende del tipo morfológico de las mismas, las galaxias elípticas y lenticulares predominan en las regiones centrales y más densas, mientras que las espirales e irregulares se encuentran en las zonas más periféricas y con menor densidad numérica de galaxias. Esta es la segregación morfológica reportada por Dressler (1980).

La detección y caracterización de cúmulos de galaxias provee una evaluación crucial de los modelos cosmológicos actuales, ya que éstas asociaciones son capaces de trazar la estructura del universo (Borgani, Plionis y Kolokotronis, 1999). Uno de los métodos más utilizado para detección de cúmulos de galaxias es el de la Secuencia Roja (RS del inglés Red Sequence, Yee, Gladders y López-Cruz, 1999). La RS es una relación lineal de galaxias de tipo temprano presente en el diagrama Color-Magnitud en los cúmulos de galaxias.

Resulta interesante la detección de cúmulos de galaxias en regiones de baja latitud galáctica como las cubiertas por el relevamiento VVV pues, como se ha mencionado en la Introducción, la distribución de galaxias en estas regiones permanece aún incompleta.

6.2.1 Análisis fotométrico del Tile do15 y el candidato a cúmulo de galaxias

De los 933 candidatos a fuentes extragalácticas detectadas en el Tile do15 y catalogadas, vamos a prestar atención aquí a un área de 30×30 minutos de arco de tamaño centrada en la concentración de fuentes rojas y extensas. En esta sección se presenta el análisis de esta concentración de fuentes rojas, posiblemente un cúmulo de galaxias identificado como VVV-J144321.0-611753.9. En esta área se han detectado 25 objetos extragalácticos simultáneamente en las tres bandas (J, H y K_s) y sólo cuatro de ellos tienen detección en las cinco bandas (Z, Y, J, H y K_s). Todos ellos fueron inspeccionados visualmente, en las diferentes bandas del relevamiento, lo cual hace que estos objetos presenten una alta probabilidad de ser galaxias. Tres objetos están fuertemente contaminados por estrellas cercanas y fueron corregidos utilizando el procedimiento descrito en la sección 3.1.1 del Capítulo 3. Por otra parte, tres objetos fueron eliminados de esta región debido su bajo brillo superficial. Son objetos muy débiles ($K_s > 16$ mag) y que además presentan una intensa contaminación estelar, lo que dificulta una correcta descontaminación. Adicionalmente, existen objetos que tienen valores de $R_{1/2}$ entre 0.78 y 0.95 segundos de arco, valores menores a los propuestos en el algoritmo de detección de la sección 3.1 del Capítulo 3. Estos objetos fueron incluidos en el análisis ya que visualmente corresponden a galaxias, debido a su forma extensa y color más rojo respecto al

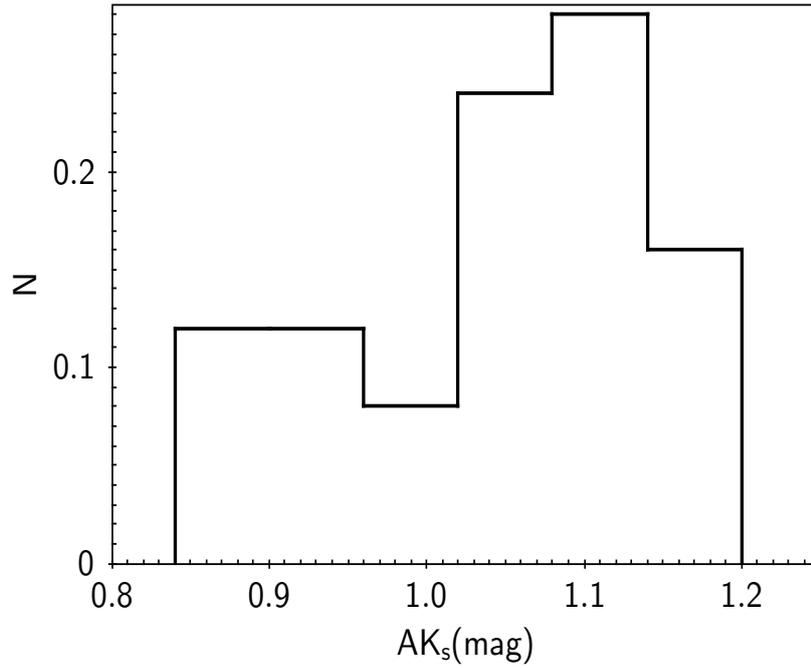


Figura 58: Distribución normalizada de la extinción galáctica en la banda K_s en la región de la concentración VVV-J144321.0-611753.9.

resto de las fuentes presentes en la imagen combinada.

Los 25 objetos extragalácticos en la región de la concentración VVV-J144321.0-611753.9 presentan magnitudes PSF en un rango de 13.70 y 16.00 mag en la banda K_s. La Figura 58 muestra la distribución de la extinción galáctica en la banda K_s para la región de VVV-J144321.0-611753.9. El valor obtenido de la mediana es de $AK_s = (1.07 \pm 0.04)$ mag. Al comparar estos resultados con la distribución de la extinción en la banda K_s para todo el Tile d015 (Figura 16), se observa que la concentración VVV-J144321.0-611753.9 se encuentra en la región de mayor extinción del Tile d015. Este resultado explica el hecho de que no lleguemos a detectar objetos más débiles que 16.0 mag en la banda K_s, como se esperaba de acuerdo al análisis en la completitud de detección desarrollado en la sección 2.1.4.1. Las medianas de los parámetros fotométricos obtenidas para estos 25 objetos son: Magnitud PSF, J = (15.50 ± 0.13) mag; H = (15.09 ± 0.14) mag y K_s = (14.64 ± 0.14) mag y colores $(H - K_s) = (0.34 \pm 0.05)$ mag, $(J - H) = (0.57 \pm 0.08)$ mag y $(J - K_s) = (0.87 \pm 0.06)$ mag. Las medianas obtenidas para los parámetros morfológicos son: $R_{1/2} = (1.59 \pm 0.16)$ arcsec; $C = 3.01 \pm 0.08$; $\epsilon = 0.30 \pm 0.03$ e índice de Sérsic, $n = 4.63 \pm 0.39$. Los objetos que forman parte de la concentración VVV-J144321.0-611753.9 son pequeños, redondeados y rojos, y además, visualmente son objetos de tipo temprano. Estos resultados están en total acuerdo con los valores encontrados en el Capítulo 4 para los objetos extragalácticos de los Tiles d010 y d115.

La Figura 59 muestra la imagen combinada en las bandas J, H y K_s de un área de 30×30 minutos de arco cuadrados donde se encuentra la concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.9. En el panel izquierdo se identifican, mediante círculos con líneas cortadas blancas, el área más interna de 1.5 minutos de arco de radio y la más externa de 15 minutos de arco de radio. En el panel derecho se muestra una ampliación de la región central. En ambas Figuras se representan

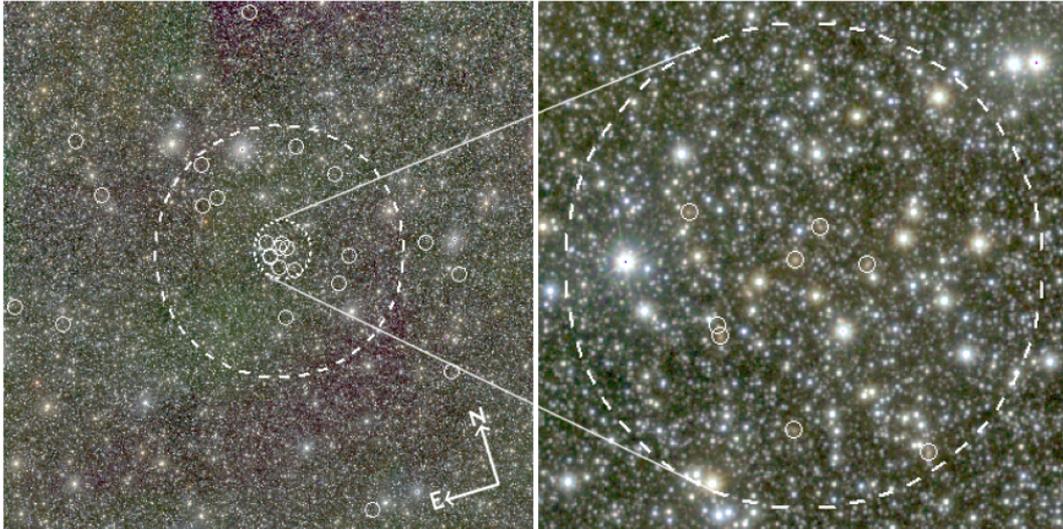


Figura 59: Imagen combinada del candidato a cúmulo de galaxias centrada en la galaxia más brillante, VVVJ144321.05-611753.9. La región estudiada abarca una área de 30×30 arcmin² (panel izquierdo). Con círculos en línea cortada se representan las regiones centrales de 3 y 7 minutos de arco de diámetro. El panel derecho muestra una ampliación de la parte más central (3 arcmin de diámetro). Los círculos pequeños blancos representan a las 25 galaxias detectadas en la región del candidato a cúmulo de galaxias.

con círculos blancos a las 25 fuentes extragalácticas detectadas en la región de la concentración VVV-J144321.0-611753.9. Es posible observar que de las 25 fuentes extragalácticas detectadas en toda esta región, 8 fuentes se encuentran en la región más interna de la concentración.

Las Figuras 60, 61 y 62 muestran imágenes de los 25 objetos extragalácticos que forman parte de la concentración VVV-J144321.0-611753.9 en las 5 bandas Z, Y, J, H y K_s del relevamiento VVV. En la Figura es posible apreciar la morfología de estos objetos, en su mayoría esferoidales con un centro brillante. También se puede observar que todas estas fuentes son claramente detectadas en las bandas J, H y K_s, y la mayoría se hace invisible en las bandas Z e Y. Estas fuentes se encuentran altamente concentradas en la región de VVV-J144321.0-611753.9 formando parte de las regiones más centrales, aproximadamente en un círculo de 30 minutos de arco de diámetro.

6.2.2 La Secuencia Roja del candidato a cúmulo de galaxias VVV-J144321.0-611753.9

La RS es una estrecha relación lineal que se encuentra en los cúmulos de galaxias y se utiliza para detectarlos (Yee, Gladders y López-Cruz, 1999). Las galaxias elípticas pueblan las regiones centrales de los cúmulos de galaxias, y los colores más rojos de estos objetos siguen una relación lineal con las magnitudes (Visvanathan y Sandage, 1977).

La Figura 63 muestra el diagrama Color-Magnitud, (J - K_s) versus K_s, de los 25 objetos extragalácticos detectados en la región de 30×30 minutos de arco cuadrados a través del procedimiento fotométrico utilizando SExtractor + PSFExF, repre-

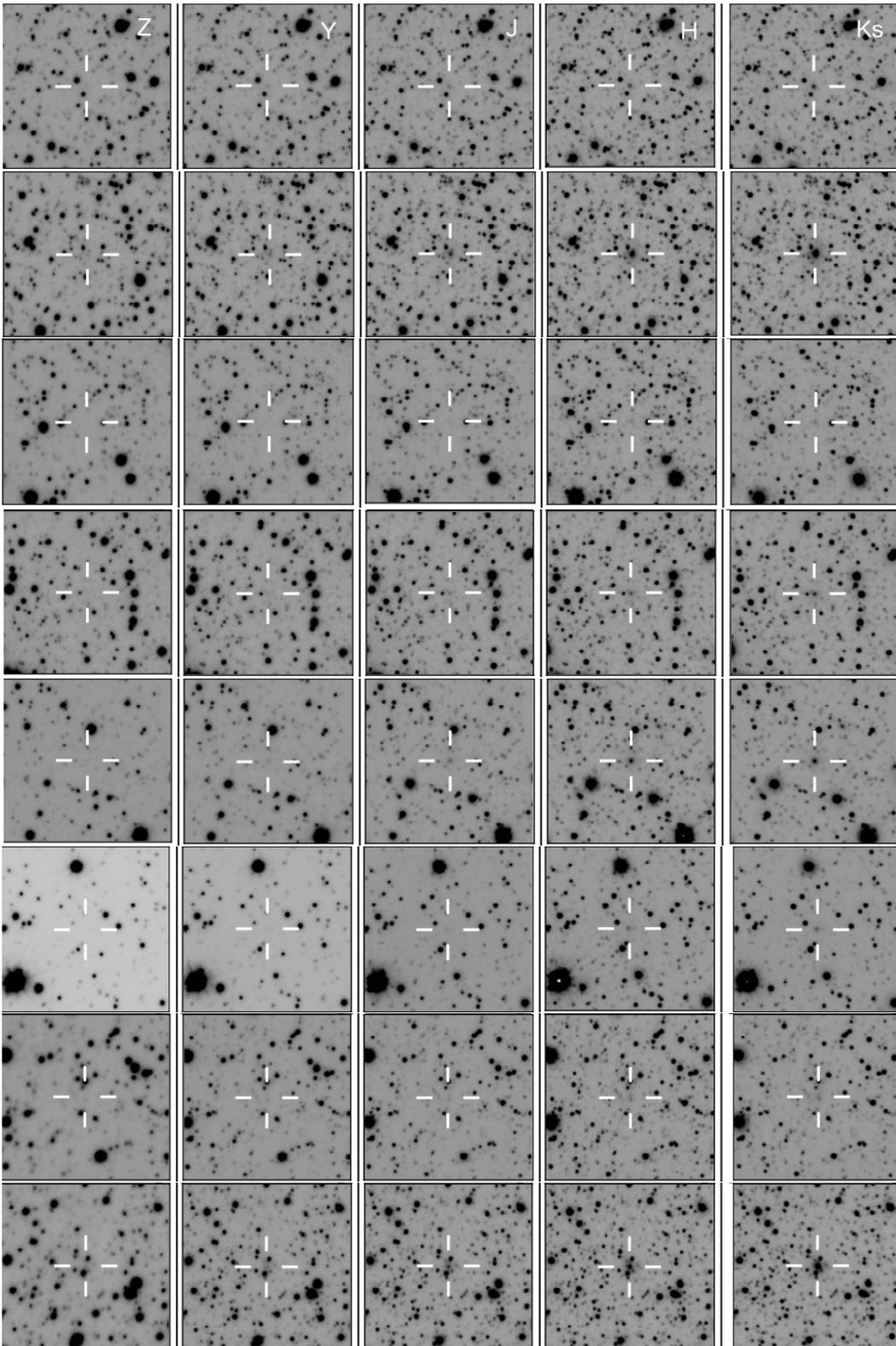


Figura 60: Imágenes de 1×1 minutos de arco cuadrado en las bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) de los los objetos extragalácticos que pertenecen a la concentración VVV-J144321.0-611753.9 del Tile d015. La cruz blanca identifica al objeto extragaláctico ubicado en el centro de cada imagen.

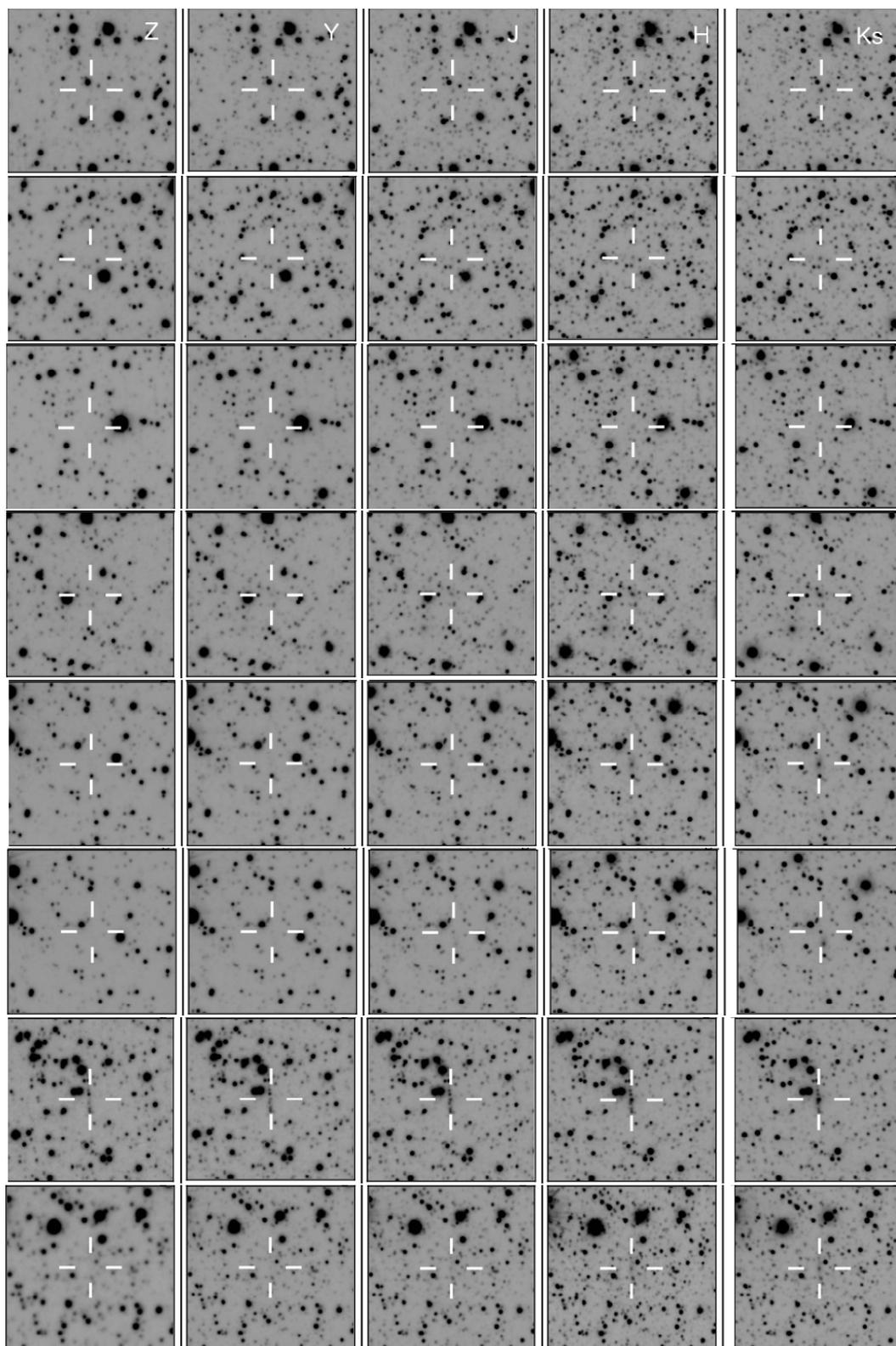


Figura 61: Imágenes de 1×1 minutos de arco en las bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) de los los objetos extragalácticos que pertenecen a la concentración VVV-J144321.0-611753.9 del Tile d015. La cruz blanca identifica al objeto extragaláctico ubicado en el centro de cada imagen.

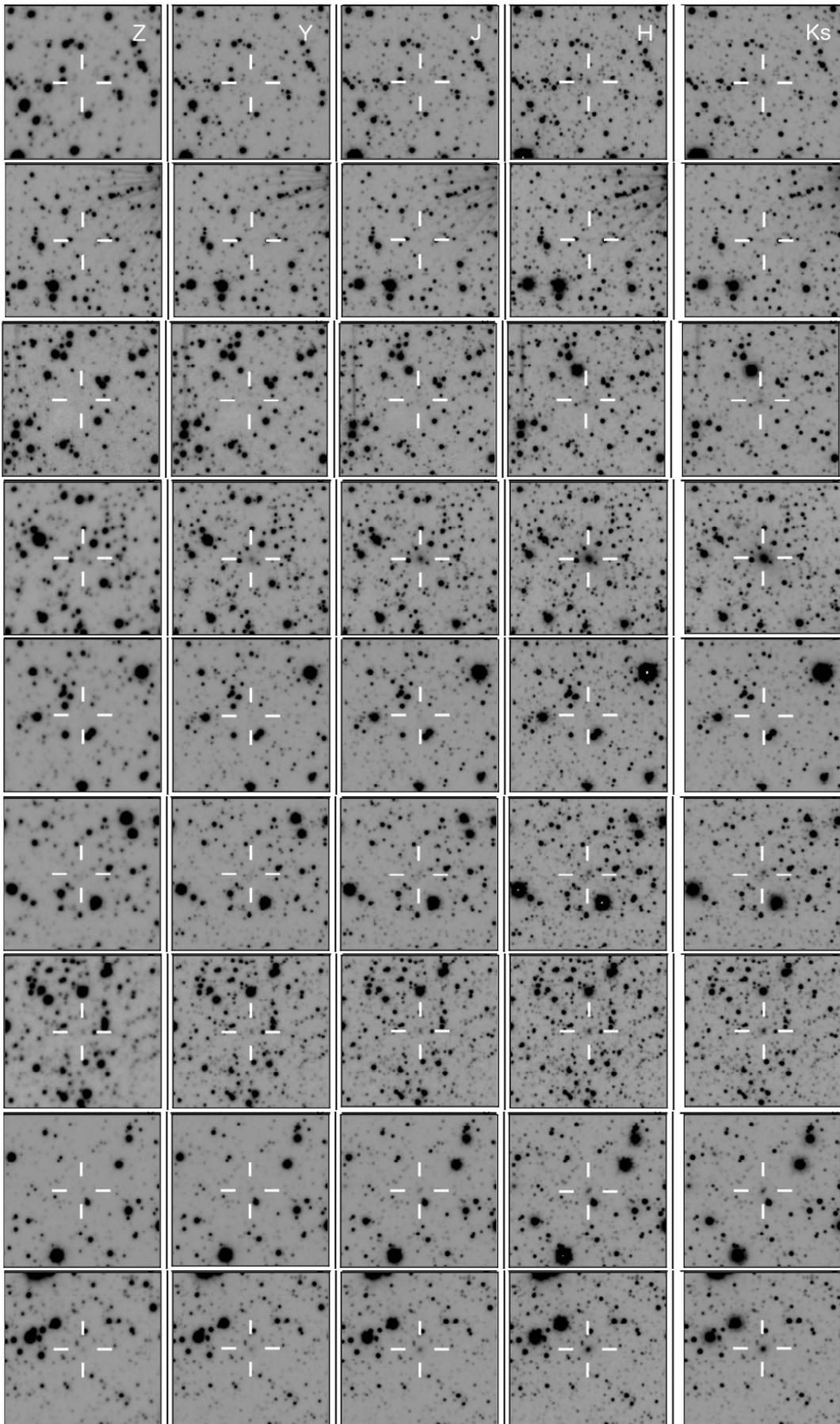


Figura 62: Imágenes de 1×1 minutos de arco en las bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) de los los objetos extragalácticos que pertenecen a la concentración VVV-J144321.0-611753.9 del Tile d015. La cruz blanca identifica al objeto extragaláctico ubicado en el centro de cada imagen.

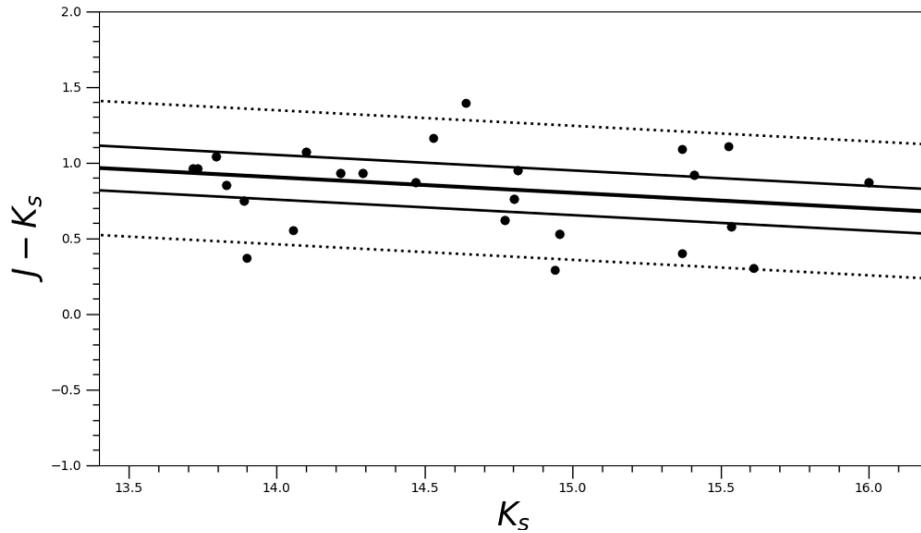


Figura 63: Diagrama Color-Magnitud de las galaxias detectadas en la región donde se encuentra la concentración de galaxias, VVV-J144321.0-611753.9. Los círculos negros representan las galaxias detectadas en la región estudiada y la línea sólida representa el mejor ajuste de la RS y 1σ de la misma. La línea de puntos representa 3σ de la RS.

sentados mediante círculos negros. En la Figura, las líneas sólidas representan el mejor ajuste de la RS y 1σ de dispersión de la misma. La recta que mejor define la RS es $(J - K_s) = (-0.103 \pm 0.054) \times K_s + (2.345 \pm 0.038)$, que fue obtenida rechazando objetos que se encuentran a más de 3σ de la misma, siguiendo la metodología de Yee, Gladders y López-Cruz (1999). La línea sólida central representa este ajuste de la RS y las líneas sólidas y punteadas representan 1σ y 3σ de la misma, respectivamente. Como puede observarse en la Figura, sólo 3 objetos quedan fuera de 3σ de la relación lineal, estos objetos corresponden a los objetos que han sido corregidos por estrellas cercanas.

La Figura 64 muestra el Diagrama Color-Magnitud ($J - K_s$) versus K_s de las galaxias que pertenecen al cúmulo Suzaku J1759-3450 extraído del trabajo de Coldwell y col. (2014), mencionado en el Capítulo i), donde se identifica la RS y 5σ de la misma. Al comparar nuestros resultados con los de Coldwell y col. (2014) observamos que llegamos casi una magnitud más profundo, la RS para el cúmulo de galaxias Suzaku J1759-3450 esta menos definida, con una pendiente de -0.028 ± 0.011 , mostrando una mayor dispersión comparada con la RS obtenida para la concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.9. Pero que el cúmulo Suzaku J1759-3450 sea detectado en rayos X es un mejor indicio de la presencia del cúmulo de galaxias. Si bien no existen datos en rayos X de la región de la concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.9 estudiada, se observa una clara y bien definida RS. La dispersión con que la obtuvimos es menor a la obtenida en Coldwell y col. (2014), y vamos tan profundo hasta donde la extinción de región de lo permite. Este resultado nos sugiere fuertemente la presencia de un cúmulo de galaxias.

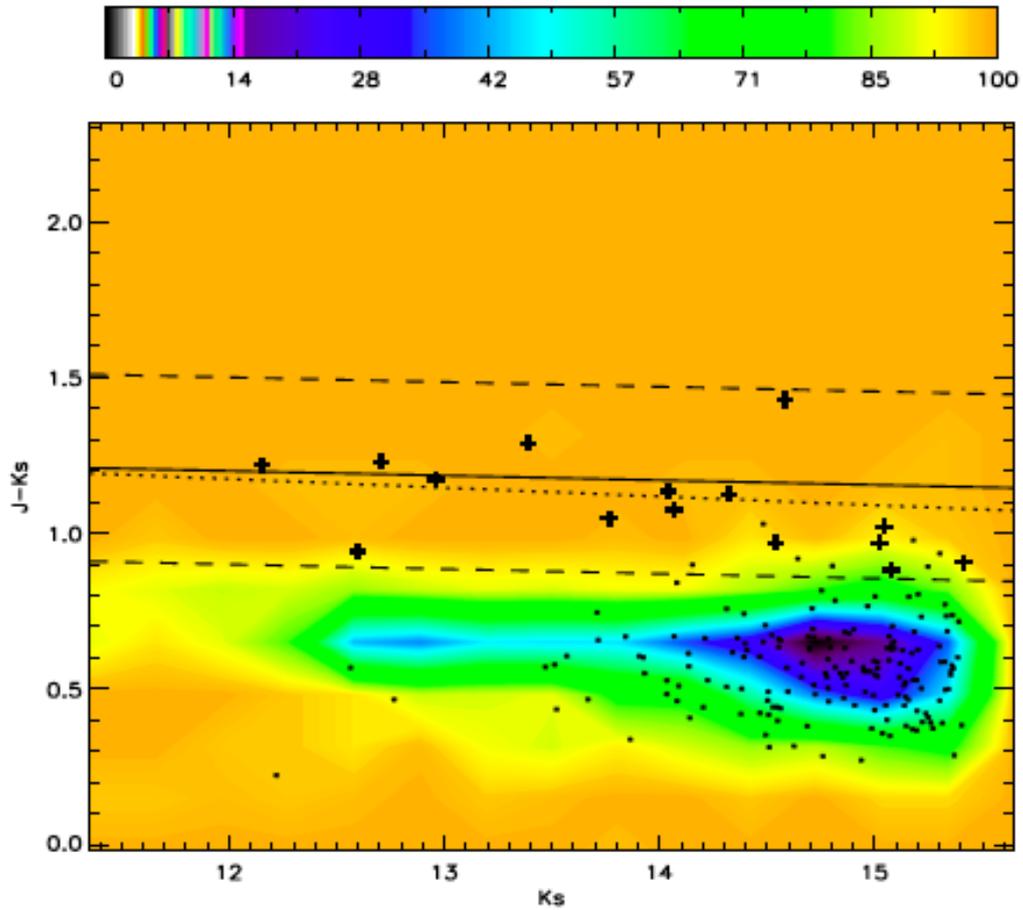


Figura 64: Diagrama Color-Magnitud ($J - K_s$) versus K_s de las galaxias del cúmulo Suzaku J1759-3450, extraído del trabajo de Coldwell y col. (2014). La línea sólida representa la RS y en línea cortada 5σ de la misma. Las galaxias están representadas mediante cruces. El mapa de densidad esta relacionado con la cantidad de objetos en la zona central del cúmulo.

6.2.3 Test fotométrico adicional de la presencia de un cúmulo de galaxias

Para brindar otra pieza de información que confirme la naturaleza de la concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.9 encontrada fortuitamente a través de la inspección visual de los Tiles del relevamiento VVV, se realizó un análisis de agrupamiento automático de los datos fotométricos. Este análisis fue realizado conjuntamente con los Lic. Bruno Sanchez y Martín de los Rios, quienes han desarrollado un método de agrupamiento con el objetivo de dividir los datos provenientes de catálogos en conjuntos de objetos asociados con una distribución de probabilidad condicional conjunta. En nuestro caso, se ha utilizado una mezcla de distribuciones Gaussianas simples para separar los datos en diferentes clases de observaciones. El número de distribuciones, los centros y extensiones de los modos son parámetros que se definen en el análisis.

En este análisis se utilizó el catálogo de 933 fuentes extragalácticas obtenido para todo el Tile d015 generado por SExtractor+PSFEx siguiendo con los criterios del algoritmo desarrollado en esta Tesis, junto con el código público Mclust (Scrucca y col., 2016). Mclust se utiliza para la búsqueda de subestructuras, a partir del ajuste de una mezcla multidimensional de Gaussianas variando algunos parámetros libres, como el número de Gaussianas y la forma de las mismas. El mejor modelo se obtiene utilizando los Criterios de Información Bayesianos (BIC) que penaliza aquellos modelos con un alto número de parámetros libres.

Para el análisis de establecer la probabilidad de que las fuentes extragalácticas estén agrupadas, se aplicó la mezcla de Gaussianas a las distribuciones de coordenadas espaciales (Ascensión recta y Declinación) de las 933 fuentes extragalácticas. Además, se tuvieron en cuenta las distribuciones de los parámetros fotométricos de los objetos extragalácticos encontrados con el procedimiento fotométrico desarrollado en este trabajo (Figura 40 y Figura 41 del Capítulo 4). En este sentido se restringieron algunos valores de los parámetros fotométricos para poder ser más restrictivos en la morfología, minimizar agrupamientos espurios, y poder tener más objetos de tipo temprano que pueblan las regiones centrales de los cúmulos de galaxias y que se ven a simple vista. El modelo que mejor ajusta a los datos tiene 4 Gaussianas esféricamente simétricas y por lo tanto, las fuentes extragalácticas fueron asignadas a 4 grupos con diferentes tamaños angulares, que varían entre 0.162 y 0.458 grados.

La Figura 65 muestra la distribución de los objetos extragalácticos en coordenadas espaciales proyectadas. Las 4 agrupaciones encontradas con este procedimiento se representan con diferentes símbolos: grupo 1 con cuadrados vacíos, grupo 2 con círculos llenos, grupo 3 con círculos vacíos y grupo 4 con cuadrados vacíos. Es importante mencionar que el grupo 2 se encuentra en la región definida por la concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.0 y los objetos que forman parte de este grupo son los objetos extragalácticos que forman parte de la misma (representados en rombos de color rojo). En la Figura, además se puede observar que este grupo es el más compacto, con la extensión angular más pequeña de 0.162 grados respecto de los demás grupos, con extensiones mayores a 0.296 grados.

Es importante verificar si estas agrupaciones pertenecen a agrupaciones físicamente ligadas. Para ello se hizo una inspección visual de las fuentes extragalácti-

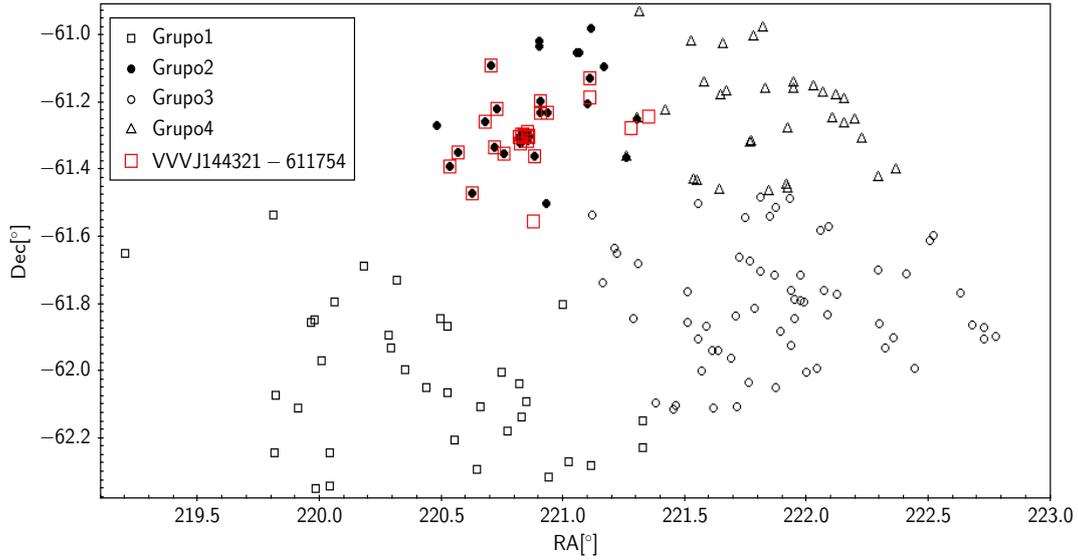


Figura 65: Distribución espacial en coordenadas ecuatoriales de los objetos extragalácticos del Tile do15 una vez aplicada la técnica de agrupamiento automático. Los grupos se representan con diferentes símbolos: grupo 1 con cuadrados vacíos; grupo 2 esta representado en círculos llenos; grupo 3 con círculos vacíos y grupo 4 con cuadros vacíos. Las galaxias que forman parte de concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.0 se representan en rombos de color rojo.

cas pertenecientes a los 4 grupos y se analizaron algunos parámetros fotométricos y morfológicos de los mismos. Las Figuras 66 y 67 presentan las distribuciones correspondientes a los colores $(J - K_s)$ y $(H - K_s)$ y las Figuras 68, 69, 70 y 71 las correspondientes a los parámetros $R_{1/2}$, C , ϵ y n . En cada una de las Figuras se especifica a que grupo pertenece cada una de ellas. La Tabla 10 presenta las principales características fotométricas y morfológicas de los 4 grupos. En la primera columna se identifica el número de la agrupación; en la segunda y tercera columna se presentan las medianas de los colores $(J - K_s)$ y $(H - K_s)$, desde la cuarta a la séptima columna las medianas de los parámetros $R_{1/2}$, C , ϵ y n ; y en la octava columna el tamaño angular de cada grupo. "Todos" corresponde a los datos de los 4 grupos en forma conjunta.

De las Figuras de las distribuciones y de la tabla es posible observar que el candidato a cúmulo de galaxias es el de menor tamaño angular de las 4 agrupaciones encontradas en forma automática. Las distribuciones correspondientes a los colores son más constantes en el grupo 2. En los grupos 1, 3 y 4 hay una mayor cantidad de objetos más azules. En la distribución correspondiente al índice de Sérsic se observa un pico alrededor 3 para el grupo 2, mientras que para los grupos 1, 3 y 4 las distribuciones son más constantes. La mediana para este parámetro es la más cercana a 4, más cercano a un perfil de de Vaucouleurs. En los otros grupos el valor de la mediana de n es mayor indicando objetos con un disco más importante. Las distribuciones correspondientes a los parámetros $R_{1/2}$, C y ϵ se presentan a modo de completitud. De la inspección visual se observó que los objetos que forman parte del grupo 2 son más rojos, con forma más extendida y además son los que forman parte de la RS de galaxias mostrada en la Figura 63.

Este método de agrupamiento automático es otra forma de sugerir que la concentración de objetos extragalácticos observada puede corresponder a un cúmulo

Tabla 10: Medianas de colores y parámetros morfológicos para los diferentes grupos de objetos extragalácticos.

Grupo	(J-K _s) [mag]	(H-K _s) [mag]	R _{1/2} [arsec]	C	ε	n	Tamaño angular [°]
1	0.63	0.19	1.39	3.17	0.317	5.62	0.458
2	0.84	0.30	1.27	3.01	0.301	4.30	0.162
3	0.61	0.20	1.33	3.06	0.418	4.75	0.380
4	0.86	0.28	1.23	3.03	0.322	5.16	0.296
Todos	0.71	0.25	1.33	3.06	0.345	5.16	

de galaxias. Es la de menor tamaño angular y con más objetos de tipo temprano encontrados en el Tile estudiado.

6.2.4 Análisis Espectroscópico

Los datos espectroscópicos son fundamentales para obtener la confirmación fehaciente de la naturaleza extragaláctica de las fuentes, probablemente galaxias, encontradas con el procedimiento fotométrico desarrollado. A partir de estos datos es posible estimar redshifts de las galaxias y estimar el redshift del cúmulo de galaxias al que pertenecen y, por consiguiente, poder confirmar si la concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.0 pertenece a un cúmulo de galaxias.

Con el objetivo de tener datos espectroscópicos de algunos objetos extragalácticos de la concentración de galaxias se obtuvo tiempo del telescopio Gemini Sur utilizando el instrumento Flamingos-2 (F2) en modo ranura larga (long slit) a partir del modo de observación Fast Turnaround (GS-2016A- FT-18). La configuración óptima de este instrumento es el modo de espectroscopía multi objeto "Multi Object Spectroscopy, F2-MOS", pero esta configuración no se encontraba disponible en el momento de llevar a cabo la observaciones.

Se seleccionaron ocho galaxias más centrales que se concentran en un radio de aproximadamente 3 minutos de arco desde el objeto más brillante y por lo tanto las distancias angulares entre ellas son siempre menores que el largo total de la ranura. Basados en esto, la estrategia de observación utilizada fue rotar la ranura de manera de observar dos objetos por ranura, usando 4 diferentes apuntamientos del telescopio.

En la Figura 72, se muestra el diagrama color magnitud como en la Figura 63, pero identificando con círculos vacíos mayores a los objetos observados. Se incluyen los datos fotométricos de siete galaxias, ya que una de las ocho galaxias observadas estaba muy contaminada por una estrella brillante cercana y se decidió eliminarla de la muestra. Las magnitudes de las galaxias seleccionadas para obtener los datos espectroscópicos van desde 13.7 hasta 14.8 mag en la banda K_s, como se puede observar en la Figura. Además de la apariencia roja y redondeada de estos objetos, los valores de las medianas de los parámetros morfológicos son: R_{1/2}= (1.7 ± 0.2) arsec, C=3.2 ± 0.1, ε=0.22 ± 0.04 y n=5.2 ± 0.8, y los valores de las medianas de los colores son (J - K_s)= (0.95 ± 0.05) mag y (H - K_s)= (0.25 ± 0.05) mag. Estas siete galaxias tienen propiedades fotométricas y morfológicas que concuerdan con

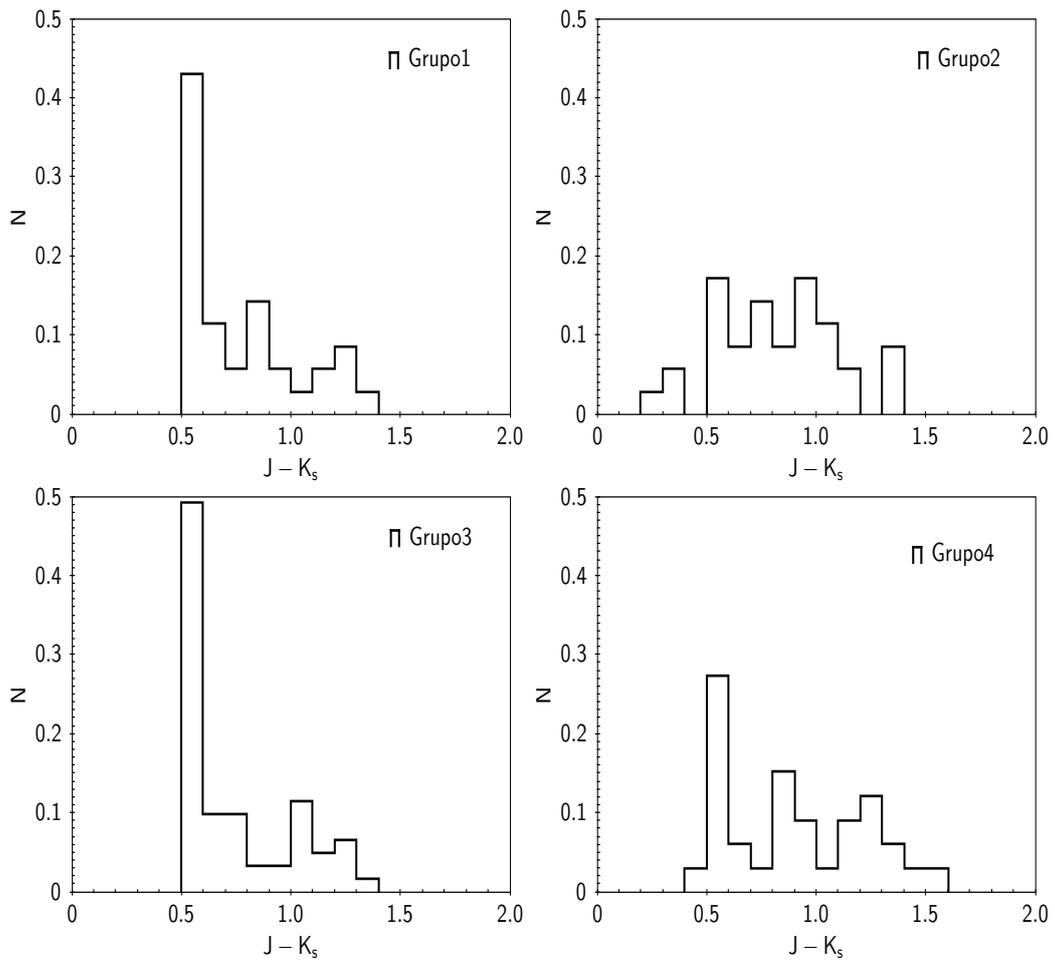


Figura 66: Distribuciones del Color ($J - K_s$) para las diferentes agrupaciones automáticas.

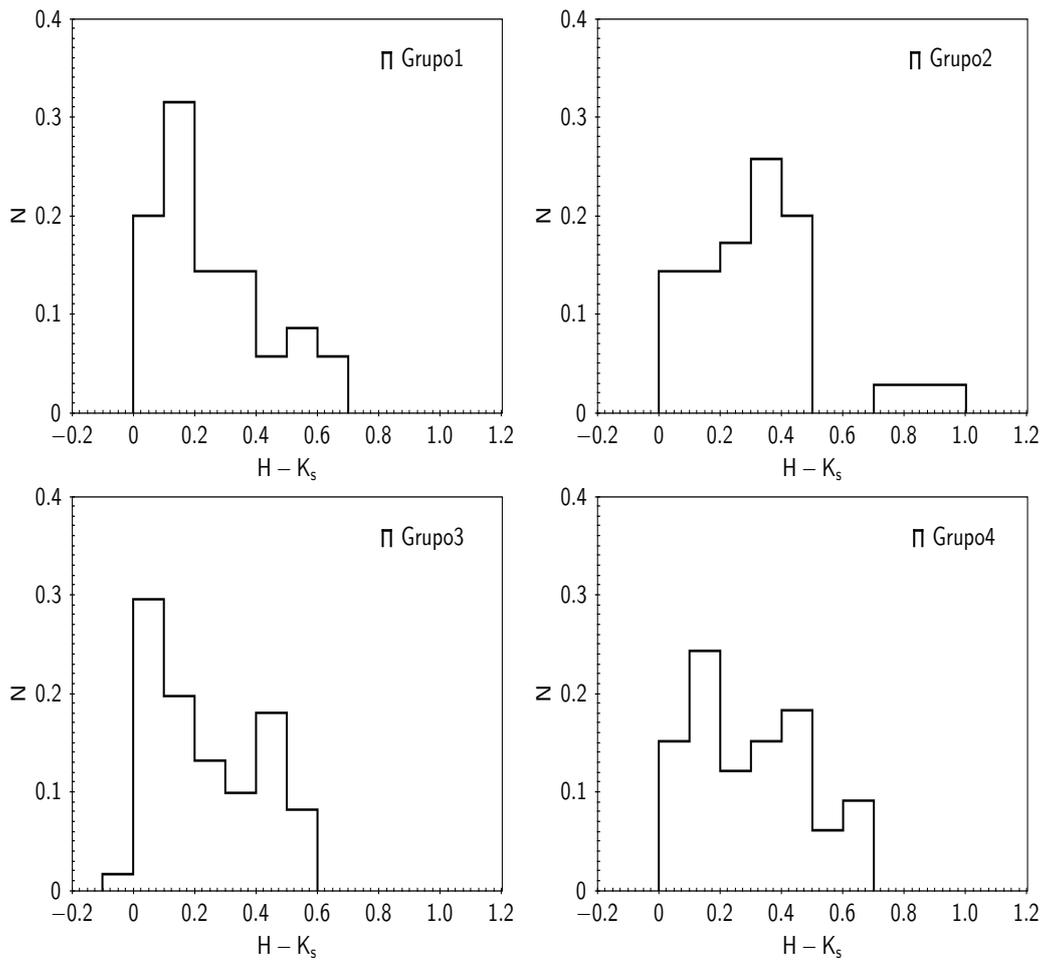


Figura 67: Distribuciones del Color ($H - K_s$) para las diferentes agrupaciones automáticas.

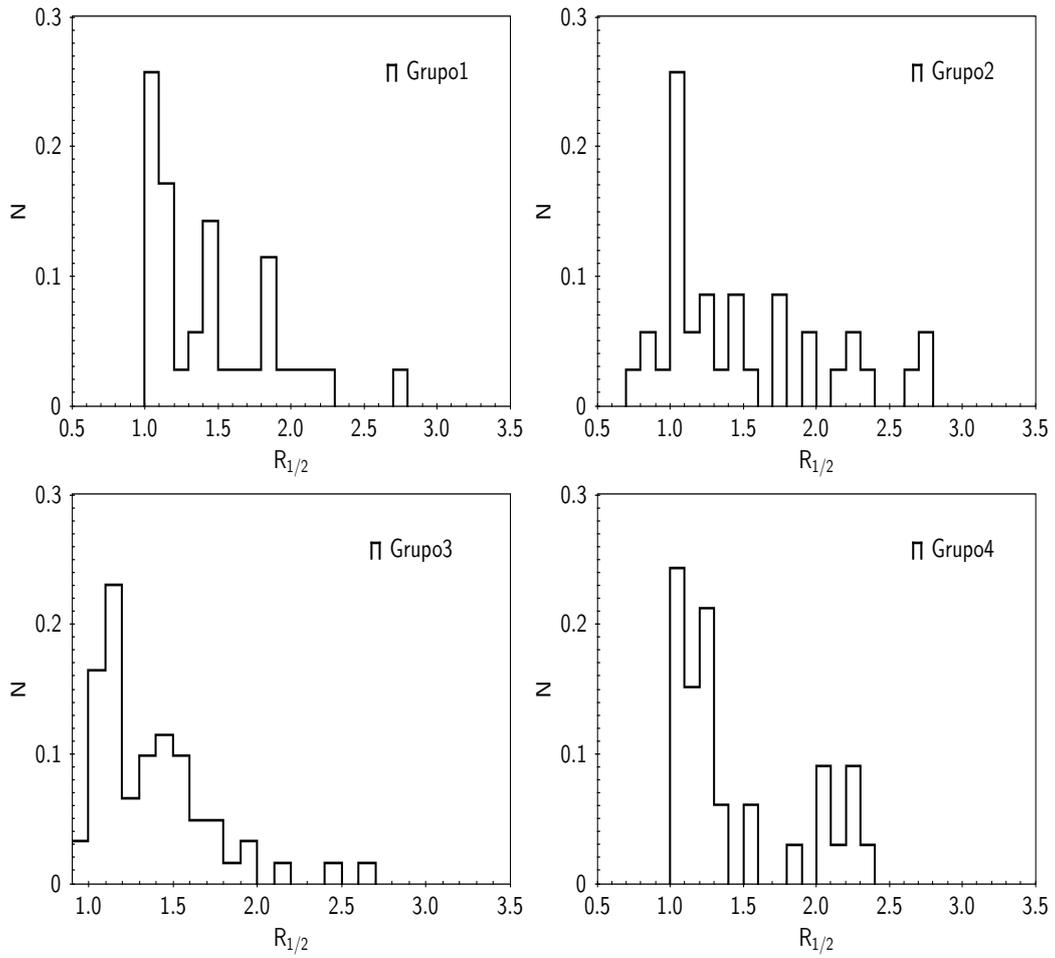


Figura 68: Distribuciones de $R_{1/2}$ para las diferentes agrupaciones automáticas.

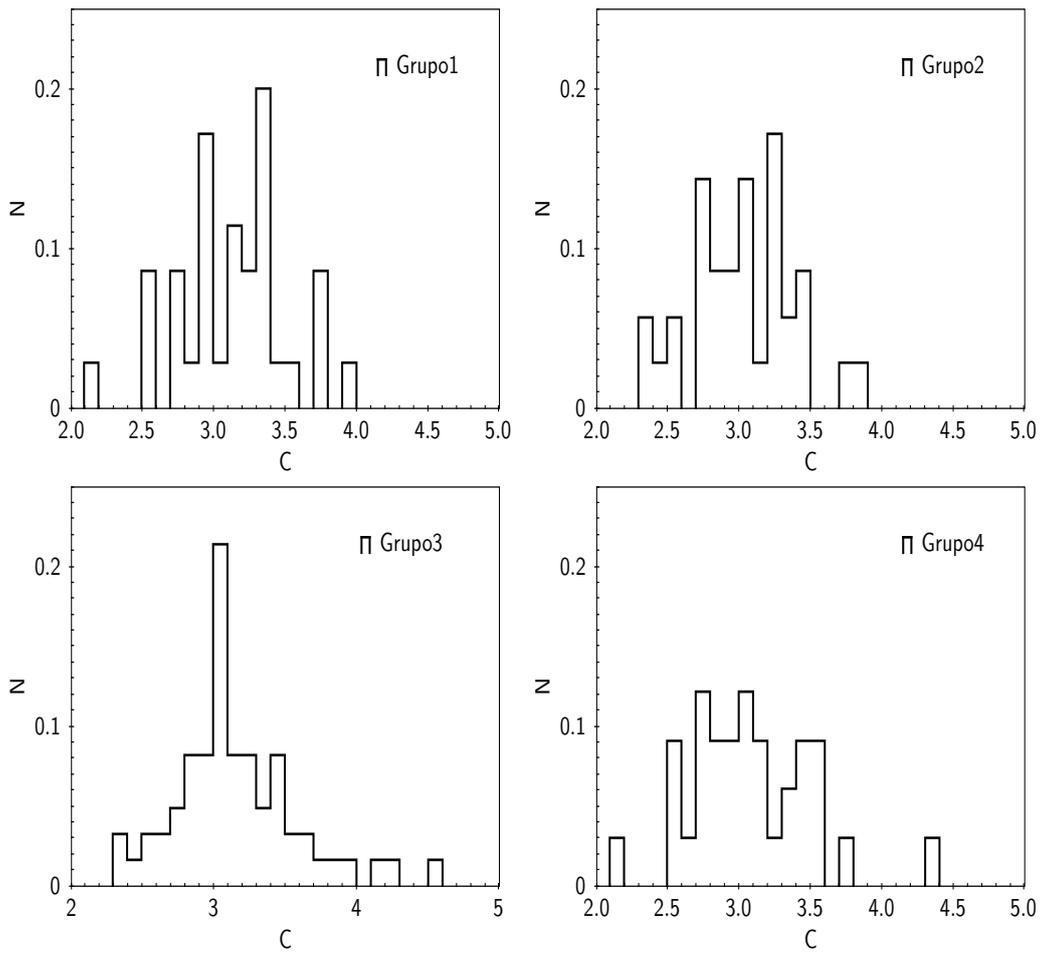


Figura 69: Distribuciones del índice de concentración para las diferentes agrupaciones automáticas.

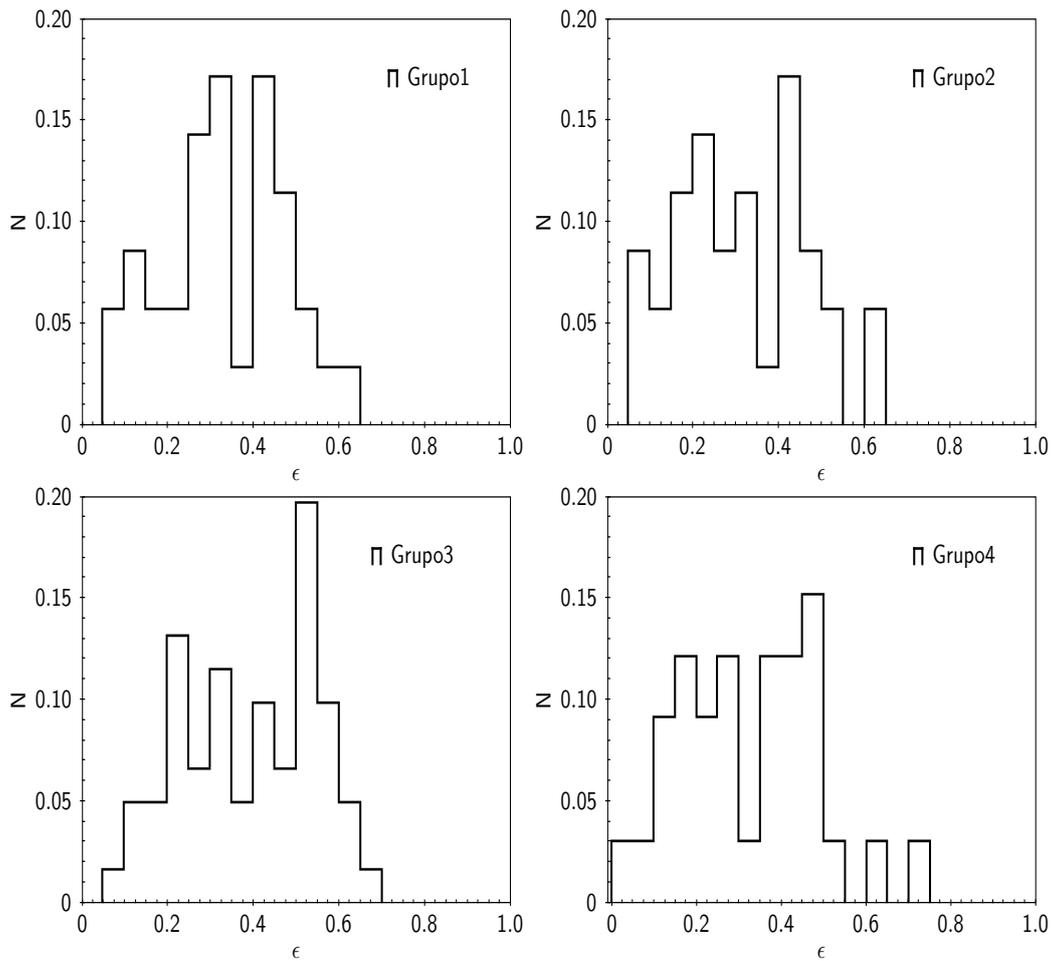


Figura 70: Distribuciones de la elipticidad para las diferentes agrupaciones automáticas.

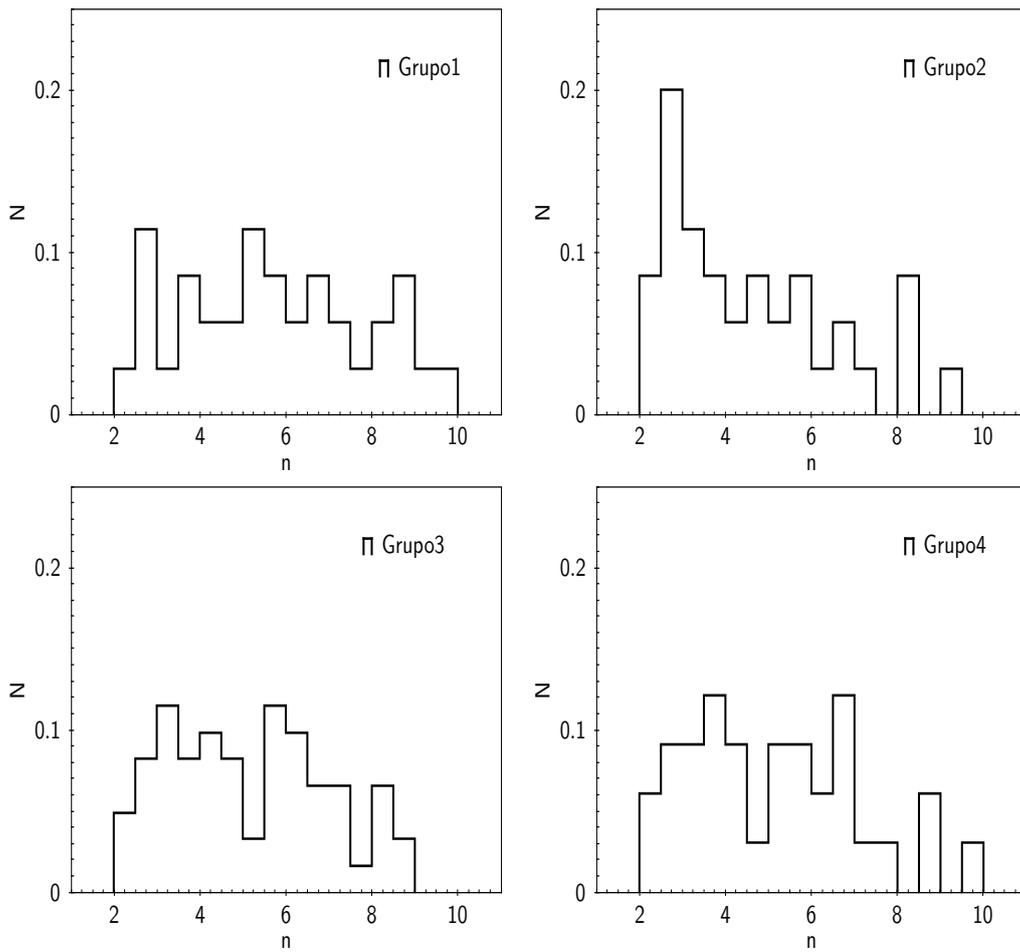


Figura 71: Distribuciones del índice de Sérsic para las diferentes agrupaciones automáticas.

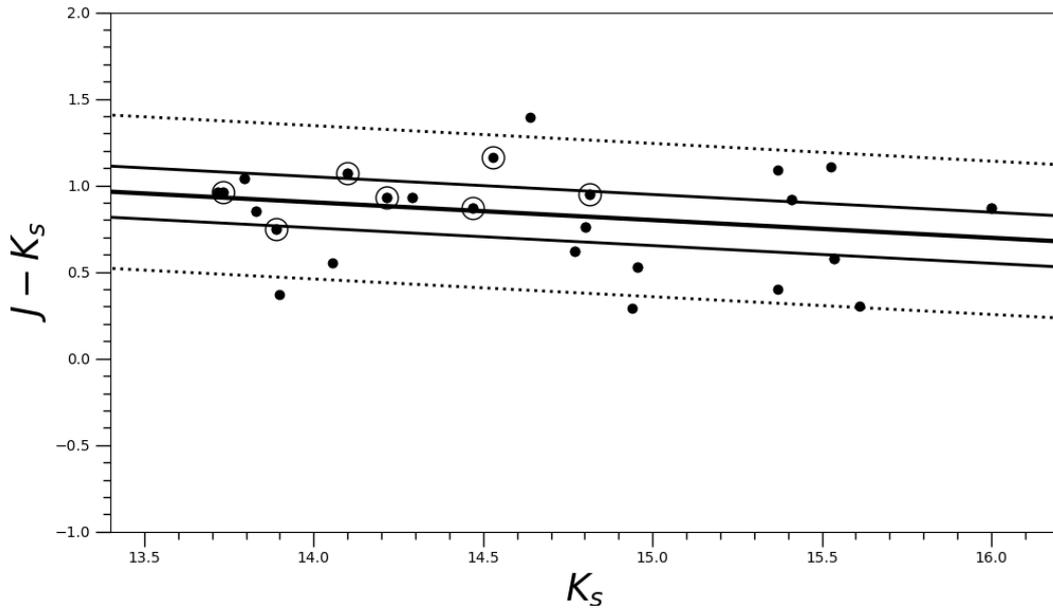


Figura 72: Diagrama Color-Magnitud de las galaxias detectadas en la región donde se encuentra la concentración de galaxias, VVV-J144321.0-611753.9. Los círculos negros representan las galaxias detectadas en la región estudiada y los círculos vacíos mayores aquellas galaxias con espectroscopía. La línea sólida representa el mejor ajuste de la RS y 1σ de la misma. La línea de puntos representa 3σ de la RS.

galaxias de tipo temprano.

Como las galaxias observadas son galaxias de tipo temprano, se verán mínimamente las características de los espectros en el IR de estos objetos. En este sentido, el trabajo de Mason y col. (2015) presenta espectros obtenidos con el espectrógrafo GNIRS (Elias y col., 2006) en el infrarrojo cercano ($0.8 \mu m$ a $2.5 \mu m$) utilizando el telescopio Gemini Norte con una resolución de $R \sim 1300$ a $R \sim 1800$, de regiones nucleares de 50 galaxias cercanas seleccionadas del relevamiento de galaxias Palomar (Ho, 1996). Este relevamiento provee un atlas espectral en el óptico de una muestra de galaxias cercanas del hemisferio norte limitada en flujo ($B < 12.5$ mag). Las galaxias seleccionadas presentan líneas de emisión correspondientes a objetos tipo Seyferts, LINERs y objetos de transición, entre las cuales se encuentran las galaxias de tipo temprano.

La línea más intensa de recombinación del hidrógeno en el rango del infrarrojo cercano es la línea $Pa \alpha$ ($1.87 \mu m$) que puede estar presente en algunos espectros, pero su ubicación en una región de transmisión atmosférica muy pobre a menudo hace que su detección sea muy incierta. Las siguientes líneas más intensas de recombinación son $Br \gamma$ ($2.165 \mu m$) y $Pa \beta$ ($1.282 \mu m$), sólo visibles en una minoría de los espectros, junto con $Pa \gamma$ ($1.093 \mu m$). A continuación se presentan los espectros en infrarrojo de las galaxias NGC 205, NGC 315, NGC 2768, NGC 2832 y NGC 410 de tipo temprano presentadas en el trabajo de Mason y col. (2015).

La Figura 73 muestra el espectro en infrarrojo cercano de la galaxia NGC 205. Esta es una galaxia elíptica enana, inactiva, de población estelar de edad in-

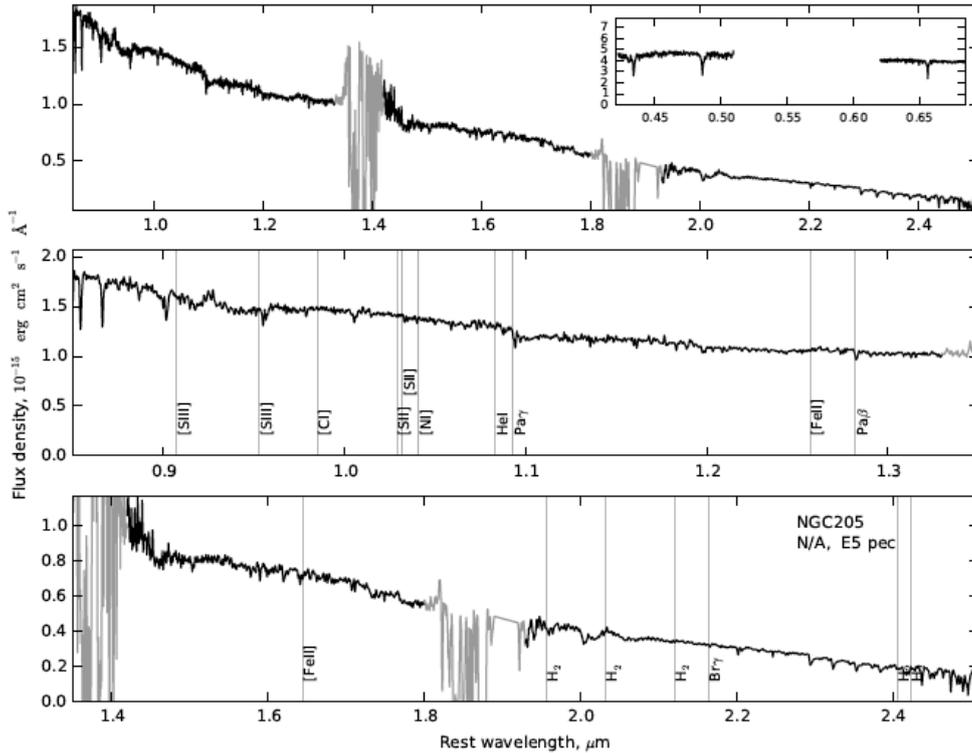


Figura 73: Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC205 extraído de Mason y col. (2015).

termedia, y además es una galaxia satélite de M31. Dada su proximidad ha sido muy estudiada en diferentes longitudes de onda. En la región óptica del espectro de esta galaxia no son visibles líneas de emisión. Se observa un continuo azul y fuertes líneas de absorción de Balmer debido a estrellas A (Bica, Alloin y Schmidt, 1990; González Delgado, Leitherer y Heckman, 1999; Cid Fernandes y col., 2004). El espectro en infrarrojo de esta galaxia está igualmente libre de líneas de emisión detectables, cualitativamente es bastante similar a los espectros de las galaxias LINERS.

En la Figura 74 se muestra el espectro de la radio galaxia gigante NGC 315 localizada en el cúmulo de Zwicky 0107.5+3212 (Zwicky y et al., 1996). Esta galaxia elíptica tiene un disco de polvo nuclear y núcleos ópticos no resueltos (Capetti y col., 2000). El espectro en infrarrojo muestra líneas prominentes de absorción de CaT y CO . Líneas de baja ionización de $[SdIII]$, $[Cl]$, y $[FeII]$ son también detectadas, junto con HeI a $1.083 \mu m$, y la línea de emisión $Pa \gamma$. La población estelar de NGC 315 es vieja, con estrellas de edad intermedia (Cid Fernandes y col., 2004).

NGC 2768 es una galaxia elíptica, la cual podría estar adquiriendo material durante un evento de acreción tidal (Crocker y col., 2008). NGC 2768 es huésped de una radio fuente compacta y de núcleo variable en rayos X (Nagar, Falcke y Wilson, 2005). El espectro en infrarrojo de esta galaxia no tiene prácticamente líneas de emisión, sólo presenta un par de líneas débiles de H_2 . La forma del continuo y las características de absorción son similares a las de las galaxias LINERS, el mismo se puede observar en la Figura 75.

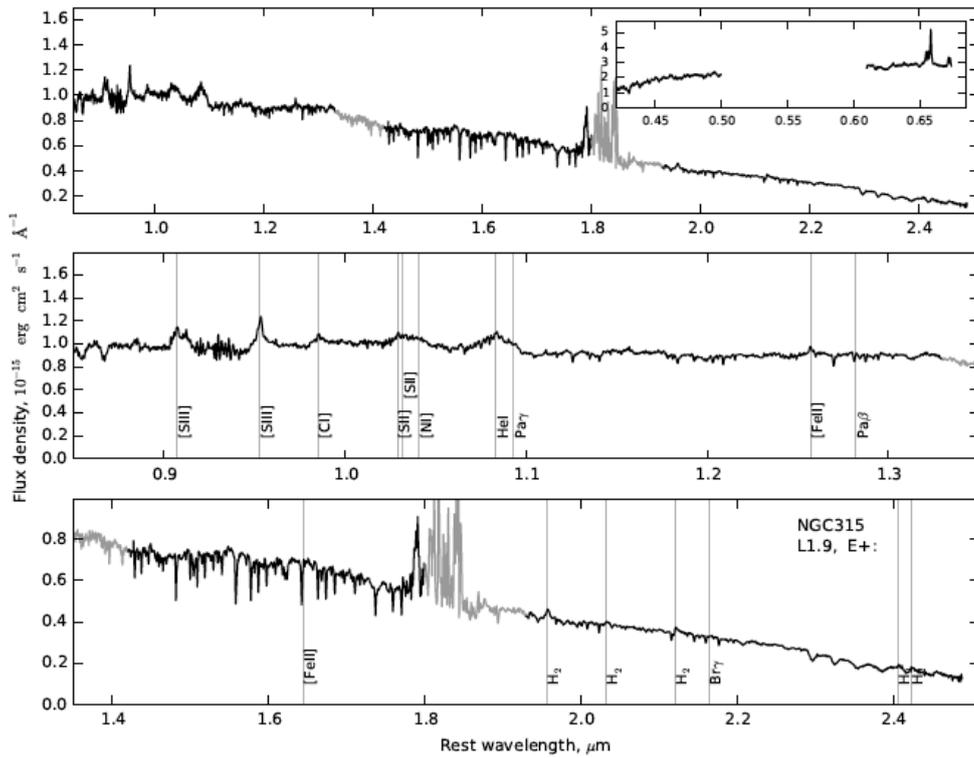


Figura 74: Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 315 extraído de Mason y col. (2015).

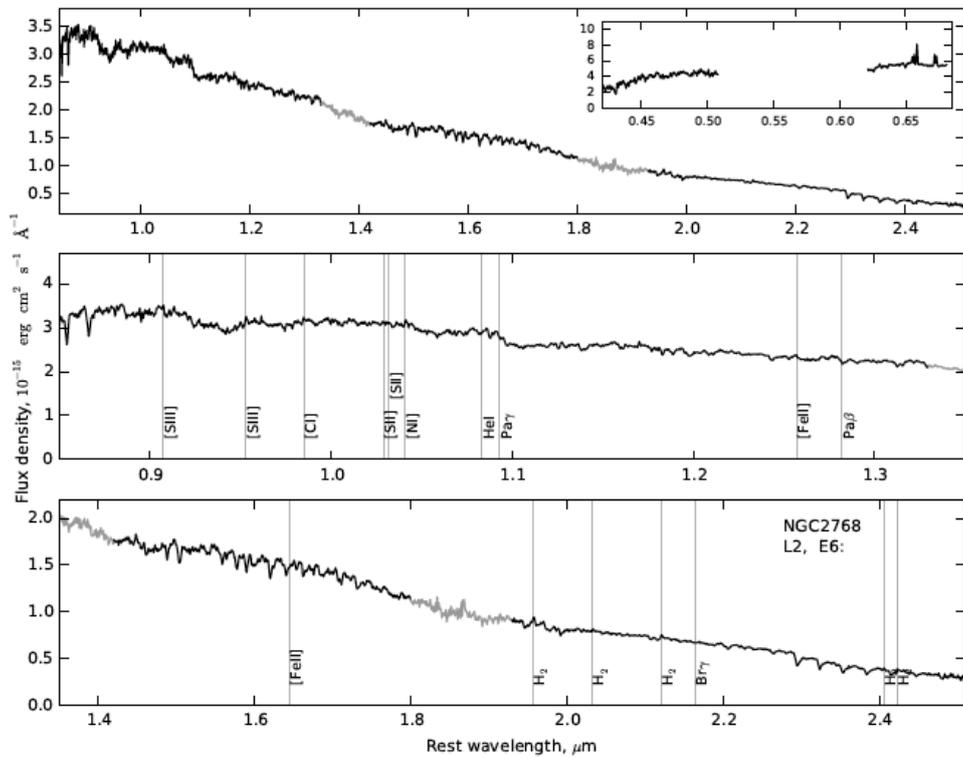


Figura 75: Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 2768 extraído de Mason y col. (2015).

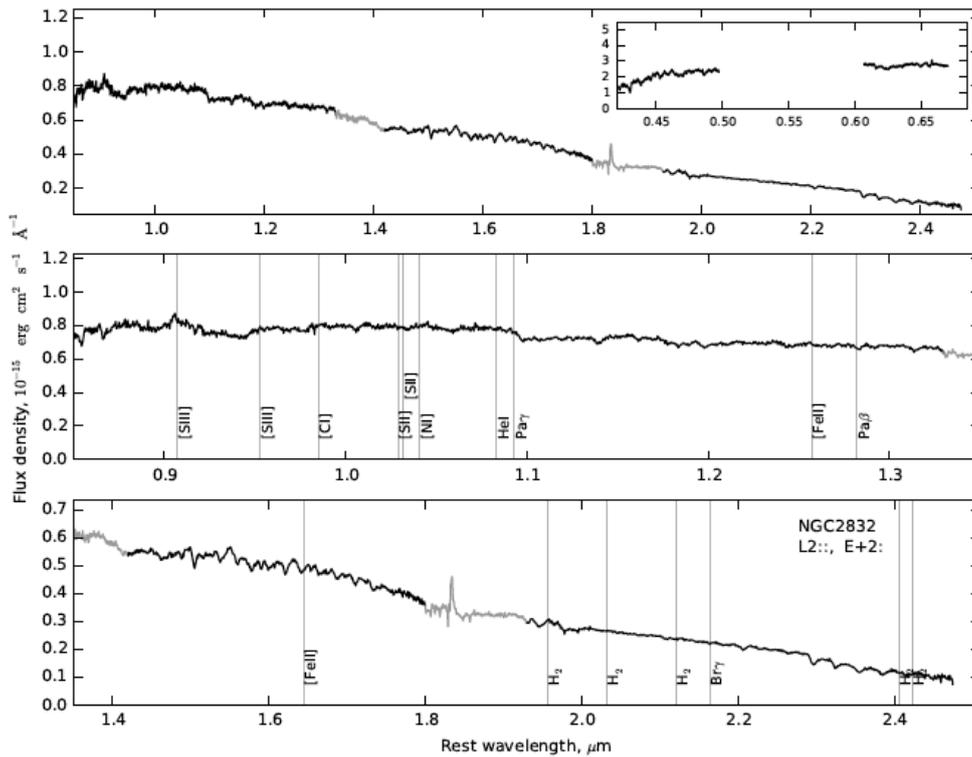


Figura 76: Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 2832 extraído de Mason y col. (2015).

NGC 2832 es una galaxia elíptica, es la galaxia más brillante del cúmulo de Abell 779. Puede ser que esté interactuando con la galaxia satélite, NGC 2831 (Lauer, 1988). La población estelar central de esta galaxia es vieja, con edades de 7.5 a 13 Gyr (Proctor y Sansom, 2002). En la Figura 76 se presenta su espectro, no detectándose líneas de emisión en los espectros en infrarrojo cercano.

Por último, la Figura 77 muestra el espectro en el infrarrojo de la galaxia elíptica central del cúmulo de Piscis NGC410 (Hudson y col., 2001). La relación S/N en el espectro es relativamente baja, pero las bandas de absorción estelar son claramente visibles en $1.1 \mu m$ y $0.93 \mu m$. No se detectan líneas de emisión identificables en el espectro en infrarrojo.

Estos espectros observados por Mason y col. (2015) muestran pocas líneas de emisión en estas galaxias de tipo temprano. Si además se desconoce el redshift de los objetos es muy difícil identificar el rango espectral de las regiones de interés.

Los espectros de las siete galaxias que forman parte de la concentración fueron obtenidos utilizando el grisma JH Go80, que cubre un rango de longitud de onda de 9700 angstroms a 18000 angstroms . Se pretendían espectros con una S/N de 60 para poder descontar las líneas de emisión del cielo y poder obtener buenas estimas de redshifts. Las condiciones de observación requeridas fueron las siguientes: calidad de imagen=85 %, vapor de agua= ANY, cobertura de nubes= 50 % y fondo de cielo=ANY. Los datos espectroscópicos fueron obtenidos durante dos noches de observación (30/07/2016 y 02/08/2016).

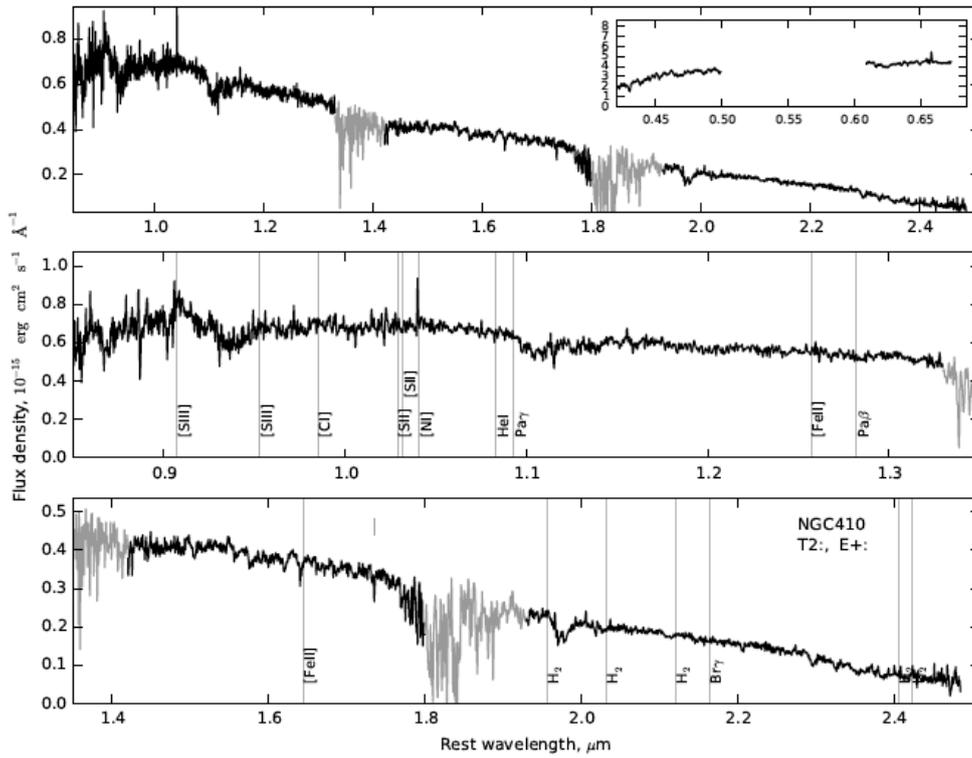


Figura 77: Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 410 extraído de Mason y col. (2015).

La Figura 78 muestra resultados preliminares de la reducción de los espectros obtenidos para dos de los objetos más brillantes de la concentración. Estos espectros fueron calibrados por flujo y corregidos por extinción debido al polvo galáctico. Los datos siguen en proceso de reducción que se está llevando a cabo con los Dres. Guillermo Danke, José L. Nilo Castellón y Hector Cuevas de la Universidad de La Serena utilizando el paquete de reducción Gemini F-2 en PyRAF. Es posible observar en la Figura que ambos espectros presentan pocas líneas, lo que sugiere que los objetos observados pueden ser de tipo temprano. Además de estas características, resulta complicado poder estimar redshifts debido al bajo señal ruido que presentan los mismos por las malas condiciones atmosféricas en que se realizaron las observaciones.

Los resultados obtenidos en este Capítulo se presentan en el artículo: **VVV-J144321.0-611753.9: The first galaxy cluster found in the VISTA Variables in the Vía Láctea survey** de L. D. Baravalle, J. L. Nilo Castellón, M. V. Alonso, C. Valotto, G. Danke, H. Cuevas, D. Minniti, R. Barbá, B. Sánchez, M. De Los Ríos, M. Domínguez, S. Gurovich & J. Díaz, que se encuentra en preparación.

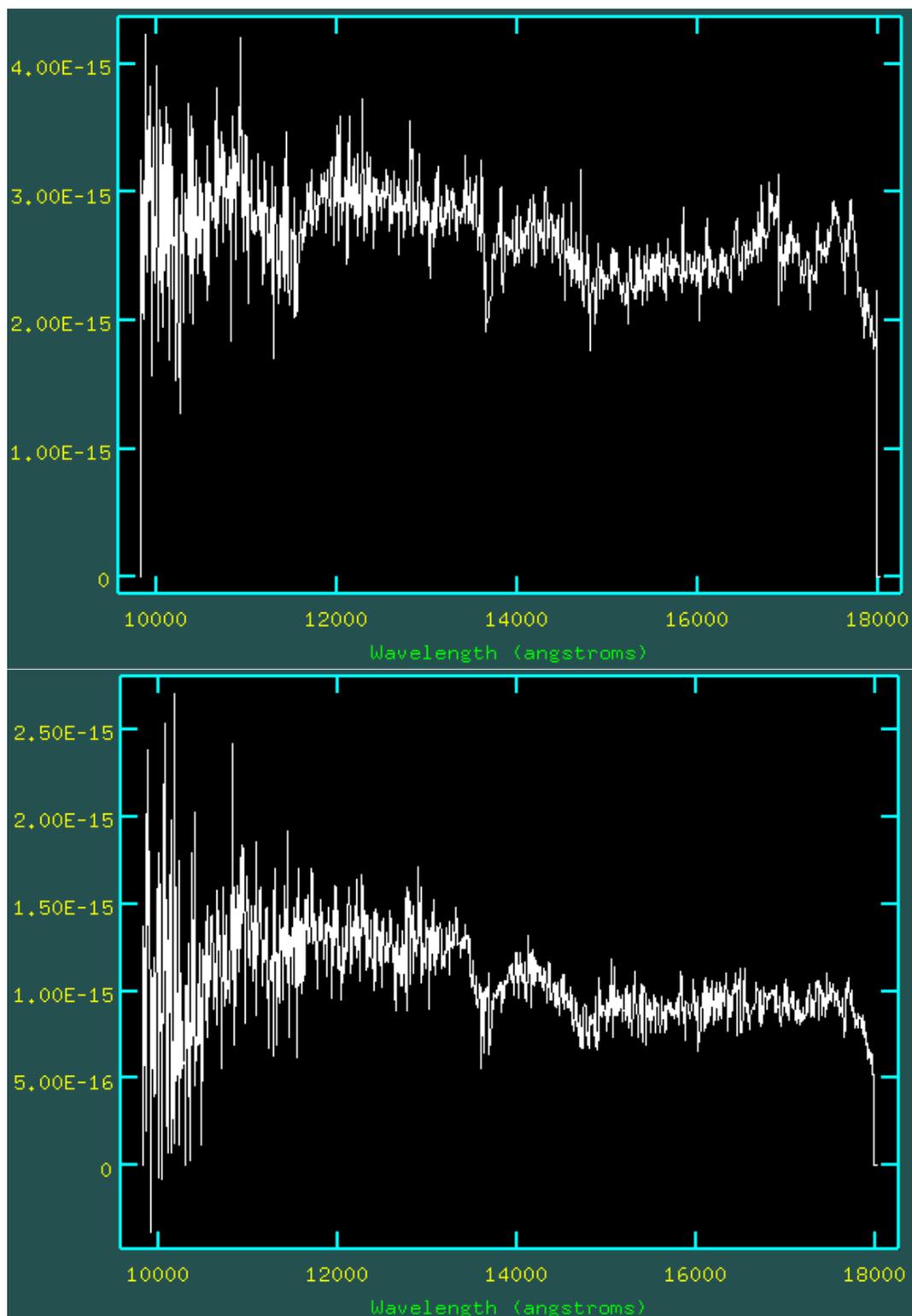


Figura 78: Espectro de dos de las galaxias más brillantes de la concentración obtenido usando F-2 en modo long-slit.

Parte III

CONCLUSIONES

El relevamiento VVV en el NIR tiene como principal objetivo estudiar la población estelar de la Vía Láctea, detectando estrellas variables. Este relevamiento nos permite buscar fuentes extragalácticas que están oscurecidas por la presencia de nuestra Galaxia. En este trabajo de tesis se presenta un algoritmo de detección y caracterización de objetos extragalácticos generado utilizando las imágenes del relevamiento VVV en las bandas Z, Y, J, H y K_s y una combinación de SExtractor + PSFEx.

Se obtuvieron parámetros fotométricos y morfológicos basados en el ajuste de la fotometría a través de la PSF en las cinco bandas Z, Y, J, H y K_s del relevamiento VVV. Entre ellos, posiciones, magnitudes totales y de apertura, elipticidades, el radio que encierra el 50% del flujo del objeto, el índice de concentración e índice de Sérsic. Los colores fueron obtenidos utilizando las magnitudes dentro de una apertura circular en 2 segundos de arco de diámetro. Los candidatos a objetos extragalácticos fueron definidos utilizando diferentes criterios en los parámetros estructurales: $CLASS_STAR < 0,3$, $1.0 < R_{1/2} < 5.0 \text{ arcsec}$, $2.1 < C < 5$, y $\Phi > 0.002$. Para eliminar falsas detecciones, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios en los colores: $0.5 < (J - K_s) < 2.0 \text{ mag}$, $0.0 < (J - H) < 1.0 \text{ mag}$, $0.0 < (H - K_s) < 2.0 \text{ mag}$, y $(J - H) + 0.9 (H - K_s) > 0.44 \text{ mag}$. Para aquellos objetos detectados en las 5 bandas del relevamiento se deben satisfacer, además, los siguientes colores: $-0.3 < (Y - J) < 1.0 \text{ mag}$ y $-0.3 < (Z - Y) < 1.0 \text{ mag}$. Todas las fuentes extragalácticas fueron visualmente inspeccionadas y son, de esta manera, candidatos más probables a ser considerados galaxias.

Este algoritmo fue testeado en diferentes regiones del relevamiento VVV, para diferentes tipos de fuentes extragalácticas. Se detectaron y estudiaron galaxias de campo en general, galaxias de núcleo activo asociadas a fuentes FERMI, y por último galaxias que se encuentran en cúmulos de galaxias. En primer lugar, el algoritmo fue aplicado a los Tiles d010 y d115 del relevamiento VVV, comparando la fotometría de los objetos estelares detectados utilizando SExtractor+PSFEx con los de CASU. Las medianas de las diferencias de las posiciones de las fuentes son: $\Delta RA \sim 3 \text{ mas}$ y $\Delta Dec \sim 8 \text{ mas}$. En cuanto a la comparación de magnitudes, las medianas de las diferencias son de $\Delta J = (0.004 \pm 0.001) \text{ mag}$, $\Delta H = (-0.014 \pm 0.001) \text{ mag}$ y $\Delta K_s = (0.046 \pm 0.001) \text{ mag}$, sin dependencia con el color. Estos resultados sugieren que el procedimiento utilizado para obtener la fotometría es adecuado.

Con este procedimiento, en los Tiles d010 y d115 fueron detectados 345 y 185 candidatos extragalácticos, respectivamente, haciendo un total de 530 fuentes con detección en las bandas J, H y K_s . Algunas de estas fuentes: 152 (Tile d010) y 142 (Tile d115) tienen además detecciones en las bandas Z e Y, o sea un total de 294 fuentes. Todas estas fuentes fueron visualmente inspeccionadas. En cuanto a las propiedades fotométricas y morfológicas, se observa un incremento en el número de candidatos extragalácticos con elipticidades menores que 0.3 para las detecciones en las cinco bandas. Asimismo, hay un aumento para valores de elipticidad más altos en la distribución correspondiente a las detecciones en 3 bandas. En la

distribución de $R_{1/2}$ se observa un pico alrededor de 1.3 segundos de arco, y el índice de Sérsic varía de 1 a 7, con un pico alrededor de 4. Las fuentes extragalácticas detectadas en ambos Tiles, son en general, pequeñas, circulares y rojas; esto se debe principalmente a la sensibilidad del NIR para seleccionar objetos más compactos y con mayor brillo superficial.

Este procedimiento fotométrico fue además aplicado al análisis de otros objetos extragalácticos, como los objetos activos o AGNs. Particularmente, se estudiaron las propiedades en NIR del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 utilizando los datos del relevamiento VVV. Los parámetros fotométricos y morfológicos obtenidos para el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 son los siguientes: CLASS_STAR = 0.99, $\Phi = -0.0003$, $C = 2.41$, $R_{1/2} = 0.53 \text{ arcsec}$, $\epsilon = 0.07$ y $n = 9.64$, magnitudes totales $Z = 17.26$, $Y = 16.96$, $J = 15.82$, $H = 16.12$ y $K_s = 15.77 \text{ mag}$, y colores $(Y - J) = 0.75$, $(J - H) = 0.70$, $(J - K_s) = 1.04$ y $(H - K_s) = 0.34 \text{ mag}$, los cuales son parámetros más característicos de objetos de tipo estelar. A partir del análisis de los diagramas Color-Magnitud y Color-Color de los objetos detectados en la región del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 se observa que el mismo ocupa una región particular en estos diagramas. Esta región corresponde a los colores $(J - K_s) > 1$ y $(Y - J) > 0.5$, de esta manera el blazar logra separarse del resto de las fuentes estelares como lo sugiere el trabajo de Cioni y col. (2011). Dentro de la región del error de la fuente Fermi se encontraron cinco fuentes WISE. Mediante el diagrama Color-Color usando WISE, es posible observar que una de ellas cumple los requisitos del método WSG para ser una fuente de emisión no térmica, la cual coincide con el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940. Además, se inspeccionaron visualmente las imágenes en las diferentes bandas de los 4 blazares. En las mismas se observa que dos de los blazares, entre ellos el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940, presentan detección en las 5 bandas, con el mismo brillo superficial, característica de los objetos de tipo estelar. Los dos restantes, en cambio, presentan características similares a la de objetos de tipo extenso.

Por último, esta metodología para detectar fuentes extragalácticas en el relevamiento VVV fue aplicada al Tile d015. Se detectaron en total 933 candidatos a fuentes extragalácticas, de las cuales 408 fuentes tienen detección sólo en las bandas J, H y K_s y 525 son detectadas en Z e Y. Este Tile contiene una concentración de fuentes rojas y extensas, posiblemente un cúmulo de galaxias identificado como VVV-J144321.0-611753.9. En una región de 30×30 minutos de arco cuadrados centrada en esta concentración se detectaron 25 fuentes extragalácticas las cuales fueron inspeccionadas visualmente y se analizaron sus parámetros fotométricos y morfológicos. Los valores de las medianas obtenidas son: Magnitudes PSF, $J = (15.50 \pm 0.13) \text{ mag}$; $H = (15.09 \pm 0.14) \text{ mag}$ y $K_s = (14.64 \pm 0.14) \text{ mag}$ y colores $(H - K_s) = (0.34 \pm 0.05) \text{ mag}$, $(J - H) = (0.57 \pm 0.08) \text{ mag}$ y $(J - K_s) = (0.87 \pm 0.06) \text{ mag}$, $R_{1/2} = (1.59 \pm 0.16) \text{ arcsec}$; $C = 3.01 \pm 0.08$; $\epsilon = 0.30 \pm 0.03$ y índice de Sérsic, $n = 4.63 \pm 0.39$. Los 25 objetos que forman parte de la concentración VVV-J144321.0-611753.9 presentan características de tipo temprano, son pequeños, redondeados y rojos. Del diagrama Color-Magnitud de los objetos extragalácticos, $(J - K_s)$ versus K_s , se obtuvo la RS dada por la ecuación $(J - K_s) = (-0.103 \pm 0.054) \times K_s + (2.345 \pm 0.038)$. La RS indica la presencia de un cúmulo de galaxias, típica relación lineal que satisfacen las galaxias de tipo temprano en los cúmulos de galaxias y que comúnmente se la utiliza para detectar sobredensidades de este tipo.

Se aplicó además un test fotométrico adicional de agrupamiento automático a todos los objetos extragalácticos detectados en el Tile do15 para corroborar la presencia del cúmulo de galaxias. De esta manera las fuentes extragalácticas fueron asignadas a 4 grupos con diferentes tamaños angulares. Las fuentes extragalácticas que pertenecen a la concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.9 fueron agrupadas en uno de estos 4 grupos. El mismo corresponde al más compacto, con la extensión angular más pequeña de 0.162 grados. Se analizaron también algunos parámetros fotométricos y morfológicos de los diferentes grupos, para verificar si estos grupos pertenecen a agrupaciones físicamente ligadas. La distribución correspondiente al color ($J - K_s$) para el grupo de fuentes extragalácticas al cual pertenece la concentración VVV-J144321.0-611753.9 es más constante, los objetos que lo constituyen son más rojos ya que forman parte de la RS de galaxias. Las distribuciones de colores de los objetos extragalácticos que forman parte de los demás grupos dan cuenta de la existencia de objetos más azules. En la distribución correspondiente al índice de Sérsic para el grupo al cual pertenece la concentración se observa un pico alrededor 3, mientras que para los grupos las distribuciones son más constantes. El valor de la mediana para el índice de Sérsic es cercano a 4, indicando un perfil de de Vaucouleurs. Esta técnica de agrupamiento automático, es otra forma de sugerir que la concentración de galaxias observada sería un cúmulo de galaxias. Esperamos confirmar la naturaleza extragaláctica de estas fuentes y establecer el redshift de dicho cúmulo con datos espectroscópicos obtenidos con el Observatorio Gemini Sur.

Este trabajo de Tesis ha desarrollado una metodología para detectar y caracterizar objetos extragalácticos en el relevamiento VVV, y ha mostrado el potencial del mismo. En el futuro se planea aplicar esta metodología desarrollada a las demás regiones del disco de la Galaxia, utilizando los datos del relevamiento VVV y de su extensión, el relevamiento VVVX. Estas regiones nos permitirán extender nuestro estudio y poder mapear más detalladamente los filamentos y estructuras en gran escala. Este trabajo implica nuevos desafíos, como por ejemplo trabajar con un gran volumen de datos, que a su vez implica procesar un gran número de imágenes astronómicas. Se pretende además, automatizar la corrección por contaminación debido a estrellas cercanas, que es fundamental para obtener parámetros fotométricos y morfológicos de precisión. Finalmente, se prevé la confirmación de la naturaleza extragaláctica de algunos candidatos extragalácticos detectados usando observaciones espectroscópicas. Para ello se planea utilizar tiempo de observación Argentino en el Observatorio Gemini Sur, con el instrumento Flamingos-2. O utilizar otros instrumentos como el ARCoIRIS (siglas en inglés de The Astronomy Research with the Cornell Infra Red Imaging Spectrograph, Schlawin y col., 2014) en el telescopio Blanco 4m, o el OSIRIC (siglas en Inglés de Ohio State Infrared Imager/Spectrograph, Depoy y col., 1993) en el telescopio SOAR (siglas en Inglés de Southern Astrophysical Research) a través de las colaboraciones que se están desarrollando con investigadores chilenos.

Es de suma importancia el análisis fotométrico y espectroscópico de los objetos extragalácticos que pueden pertenecer al Grupo Local o a estructuras en gran escala y que por mucho tiempo estuvieron inaccesibles debido al gran oscurecimiento y absorción de nuestra Galaxia. De esta manera, se podrá contribuir al estudio de la distribución de galaxias en cúmulos de galaxias y filamentos en gran escala en estas regiones ocultas del cielo. Todo este análisis permitirá identificar las conexio-

nes entre estructuras que yacen en estas regiones, estimar tamaños de las mismas y poder así verificar algunas predicciones del modelo cosmológico estándar.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 Ejemplos de galaxias y fuentes extensas detectadas en el relevamiento 2MASS del trabajo de Jarrett y col. (2000a). Cada imagen tiene un tamaño angular de 90 segundos de arco. En el eje de las abscisas se representan las magnitudes y en el de las ordenadas la latitud galáctica. 6
- Figura 2 Vista panorámica del cielo en infrarrojo cercano extraída del trabajo de Jarrett (2004). La localización del GA se indica por la flecha azul abajo a la derecha. 7
- Figura 3 Imagen combinada en las bandas J, H, y K_s del VVV de 20 fuentes clasificadas como candidatos a galaxias en el trabajo de Amôres y col. (2012). Cada candidato se ubica en el centro de la imagen y es identificado con una flecha amarilla. 9
- Figura 4 Imágen combinada en las bandas J, H, y K_s del VVV del cúmulo de galaxias Suzaku J1759-3450 presentado en el trabajo de Coldwell y col. (2014). En línea cortada blanca, se representa un círculo de 1.61 minutos de arco de radio centrado en el pico de emisión en rayos X y los recuadros rojos encierran a las galaxias pertenecientes al cúmulo. 10
- Figura 5 Representación esquemática de los diversos relevamientos llevados a cabo con el telescopio VISTA. La imagen es una proyección del cielo entero con la Vía Láctea a través del centro. 13
- Figura 6 Curvas de transmisión para los cinco filtros Z, Y, J, H y K_s de la cámara VIRCAM, en comparación con los perfiles típicos de transmisión atmosférica para una masa de aire de 1.0 y 1.0 mm de vapor de agua, extraídas de Saito y col. (2012). 15
- Figura 7 Esquema del movimiento en ascensión recta (horas) y declinación (grados) del campo de visión del telescopio para generar un Tile. 15
- Figura 8 Esquema general de la construcción de un Tile. 16
- Figura 9 Área de cobertura del relevamiento VVV en coordenadas galácticas. En cuadros color rojo se representa a los diferentes Tiles, indicando en la Figura la numeración correspondiente a cada uno de ellos. 17
- Figura 10 Área de cobertura del relevamiento VVVX y VVV en coordenadas galácticas. En cuadros de color rojo se representa a los Tiles del VVV y en color azul, celeste, amarillo y verde los nuevos Tiles que se incluyen en el VVVX. 18

- Figura 11 Representación del área de cobertura del relevamiento VVV junto con la distribución de objetos extensos catalogados en el relevamiento 2MASSX en coordenadas galácticas. Mediante rectángulos sombreados se muestran los Tiles estudiados, el Tile d115 en latitudes galácticas positivas y el Tile d010 en latitudes galácticas negativas. 19
- Figura 12 Distribuciones normalizadas de la extinción galáctica en la banda K_s de las regiones de los Tiles d010 y d115. La extinción correspondiente al Tile d010 se representa con línea continua y la del Tile d115 con línea cortada. 20
- Figura 13 Representación del área de cobertura del relevamiento VVV junto con la distribución de objetos extensos catalogados en el relevamiento 2MASSX en coordenadas galácticas. El rectángulo sombreado representa el Tile d216. 21
- Figura 14 Distribución normalizada de la extinción galáctica en la banda K_s correspondiente a una región del Tile b206. 21
- Figura 15 Representación del área de cobertura del relevamiento VVV junto con la distribución de objetos extensos catalogados en el relevamiento 2MASSX en coordenadas galácticas. El rectángulo sombreado representa el Tile d015. 22
- Figura 16 Distribución normalizada de la extinción galáctica en la banda K_s correspondiente al Tile d015. 22
- Figura 17 Ilustración de las cuatro aperturas posibles para el cálculo de las diferentes magnitudes proporcionadas por SExtractor. De arriba hacia la derecha: MAG_ISO, MAG_AUTO, MAG_ISOCOR y MAG_APER. 27
- Figura 18 Archivo de configuración de SExtractor utilizado para la extracción de fuentes. 29
- Figura 19 Completitud en porcentaje para la detección de fuentes puntuales y galaxias en la magnitud K_s . Círculos negros llenos y línea sólida corresponden al Tile d010, los círculos vacíos y líneas cortadas corresponden al Tile d115. También se representan mediante línea sólida los niveles de completitud del 80% y 50%. 32
- Figura 20 Comparación de las posiciones de las fuentes puntuales detectadas utilizando SExtractor+PSFEx y CASU. Las diferencias corresponden a $\Delta = \text{SEXTRACTOR+PSFEX} - \text{CASU}$ en Ascensión Recta y en Declinación. El panel izquierdo muestra los resultados obtenidos para el Tile d010 y el panel derecho los resultados para el Tile d115. 34
- Figura 21 Comparación de magnitudes de fuentes puntuales. Los paneles muestran las diferencias en magnitudes entre SExtractor+PSFEx y CASU, ΔJ , ΔH y ΔK_s (izquierda a derecha), como función de las magnitudes SExtractor+PSFEx. 34
- Figura 22 Dependencia de color de fuentes puntuales. Los paneles muestran ΔJ , ΔH y ΔK_s (izquierda a derecha) como función de los colores de SExtractor+PSFEx. 35

- Figura 23 Diferentes parámetros morfológicos utilizados para clasificar a los objetos detectados en el Tile d010 (paneles superiores) y en el Tile d115 (paneles inferiores). Los paneles muestran (de izquierda a derecha) $R_{1/2}$ y C ; y el índice Φ , todos ellos en función de la magnitud PSF K_s . La barra de color esta relacionada con el índice de estelaridad CLASS_STAR. 37
- Figura 24 Diferentes parámetros morfológicos utilizados para clasificar a los objetos detectados en el Tile d010. Los paneles superiores muestran (de izquierda a derecha) $R_{1/2}$ y C ; y los paneles inferiores los índices Φ y CLASS_STAR, todos ellos en función de la magnitud PSF K_s . En círculos llenos de color negro se representan a los objetos extensos. 38
- Figura 25 Diferentes parámetros morfológicos utilizados para clasificar a los detectados en el Tile d115. Los paneles superiores muestran (de izquierda a derecha) $R_{1/2}$ y C ; y los paneles inferiores los índices Φ y CLASS_STAR, todos ellos en función de la magnitud PSF K_s . En círculos llenos de color negro se representan a los objetos extensos. 39
- Figura 26 Distribuciones correspondientes a los índices de estelaridad CLASS_STAR, $R_{1/2}$ (paneles superiores), brillo superficial y el parámetro Φ (paneles inferiores) como función de la magnitud de Kron para estrellas (cruces azules) y galaxias simuladas (puntos magenta) extraídas del trabajo de Annunziatella y col. (2013). En líneas cortadas se representan los límites de separación en la clasificación estrella - galaxia. 40
- Figura 27 Imágenes de galaxias contaminadas por estrellas cercanas, extraídas del trabajo de Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014). Primera y tercera columna (de izquierda a derecha) muestran las imágenes de las galaxias detectadas. La segunda y cuarta columnas (de izquierda a derecha) muestran las imágenes de las mismas galaxias luego del proceso de sustracción de estrellas. 42
- Figura 28 Panel izquierdo: Imagen en la banda K_s de una galaxia con la presencia de estrellas cercanas. Panel derecho: misma imagen luego de aplicar la rutina KILLALL para eliminar las estrellas cercanas a la galaxia. Imagen extraída del trabajo del trabajo de Skelton, Woudt y Kraan-Korteweg (2009). 42
- Figura 29 Ejemplo de una imagen en la banda K_s de una fuente extensa contaminada por una estrella cercana detectada en el Tile d115 (panel izquierdo), y la misma fuente luego de aplicarse la limpieza por estrellas cercanas (panel derecho). 43
- Figura 30 Ejemplo de fuentes extragalácticas detectadas en 3 bandas (panel superior) y en las 5 bandas (panel inferior) en los Tiles estudiados del relevamiento VVV. 45

- Figura 31 Ejemplo de imágenes de galaxias y estrellas dobles de brillo superficial comparable detectadas en el relevamiento 2MASS, extraída del trabajo de Jarrett y col. (2000a). El panel superior muestra gran variedad de estrellas dobles detectadas en el relevamiento 2MASS; y en panel inferior muestra galaxias con flujos totales integrados similares al de las estrellas del panel superior. 46
- Figura 32 Mapas de densidad Color-Color para fuentes estelares simuladas del relevamiento VVV extraídos del trabajo Amôres y col. (2012). Panel superior izquierdo: (J - H) versus (H - K_s), panel superior derecho (J - H) versus (Y - J), y panel inferior (Y - J) versus (Z - Y). Los candidatos a galaxias reportados en este trabajo se representan con cruces (tipo I) y con diamantes (tipo II). 47
- Figura 33 Diagramas Color-Color: (J - H) versus (H - K_s) de fuentes en regiones de baja densidad estelar (panel izquierdo) y zonas de alta densidad estelar (panel derecho) en el relevamiento 2MASS (Jarrett y col., 2000a). Las galaxias se representan con círculos, las estrellas dobles con triángulos, y las estrellas triples con cruces. La línea sólida demarca la secuencia principal. 48
- Figura 34 Diagramas Color-Magnitud y Color-Color para los objetos extensos detectados en las bandas J, H y K_s. En los paneles superiores se muestran las detecciones correspondientes al Tile d010 y en los paneles inferiores las correspondientes al Tile d115. Los puntos pequeños representan a los objetos extensos y los círculos más grandes representan a los objetos extragalácticos. 49
- Figura 35 Diagrama Color-Color de los candidatos a objetos extragalácticos detectados en las 5 bandas. Con círculos abiertos se representan a las detecciones en el Tile d010 y en círculos llenos a las detecciones en el Tile d115. 50
- Figura 36 Diagrama de flujo del algoritmo completo de selección de candidatos a fuentes extragalácticas. 51
- Figura 37 Distribución de los candidatos a fuentes extragalácticas en coordenadas Galácticas. Para el Tile d010 (panel superior) y para el Tile d115 (panel inferior) se representan los candidatos detectados en las 3 bandas (círculos llenos) y en las 5 bandas (cruces), junto con las fuentes extragalácticas del 2MASS (triángulos). 52
- Figura 38 Imágenes combinadas en las bandas J, H, y K_s de algunos ejemplos de objetos extragalácticos detectados en el Tile d010. Los recuadros en líneas cortadas blancas representan un área de 20×20 segundos de arco. Norte hacia arriba y Este hacia la izquierda. 56
- Figura 39 Imágenes combinadas en las bandas J, H, y K_s de algunos ejemplos de objetos extragalácticos detectados en el Tile d115. Los recuadros en líneas cortadas blancas representan un área de 20×20 segundos de arco. Norte hacia arriba y Este hacia la izquierda. 57

- Figura 40 Distribuciones normalizadas de magnitudes J, H y K_s y el color (H - K_s) de los candidatos a objetos extragalácticos. Paneles superiores muestran los histogramas de magnitudes J y H, y los paneles inferiores la magnitud K_s y el color (H - K_s). Las distribuciones correspondientes a los objetos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) se representan con línea sólida, y con línea cortada se representan las distribuciones correspondientes a aquellos candidatos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s). 59
- Figura 41 Distribuciones normalizadas de parámetros estructurales de los candidatos a objetos extragalácticos. Paneles superiores muestran histogramas de $R_{1/2}$ y C, y los paneles inferiores histogramas de elipticidad y el índice de Sérsic. Los histogramas están representados de la misma manera que la Figura 40. 60
- Figura 42 Distribuciones de colores NIR obtenidas por Williams, Kraan-Korteweg y Woudt (2014). En el panel izquierdo se muestra la distribución correspondiente al color (J - H) en azul, el panel del medio muestra el color (H - K_s) en verde; y el panel derecho el color (J - K_s) en rojo. Las líneas verticales indican los valores medios de cada distribución. 61
- Figura 43 Imágenes a color de ejemplos de galaxias brillantes presentadas en el trabajo de Said y col. (2016b). 62
- Figura 44 Ejemplo de galaxias que presentan diferentes valores del índice de Sérsic extraídas del trabajo de Hiemer et al. (2014). 62
- Figura 45 Mapa de densidad de las distribuciones correspondientes al índice de Sérsic en función de la magnitud K_s para galaxias detectadas en los relevamientos 2MASS, UKIDSS y VISTA VIKING extraído de Andrews y col. (2014). 63
- Figura 46 Índice de concentración en función de la asimetría para una muestra de galaxias de distintos tipos morfológicos en el óptico representadas con diversos símbolos. Figura extraída del trabajo de Conselice, Bershady y Jangren (2000). 64
- Figura 47 Mapa del cielo completo en coordenadas galácticas mostrando los diferentes tipos de fuentes catalogadas por Fermi-LAT extraída del trabajo de Acero y col. (2015). 66
- Figura 48 Mapa de la región del plano galáctico mostrando los diferentes tipos de fuentes catalogadas por Fermi-LAT extraída del trabajo de Acero y col. (2015). 67
- Figura 49 Esquema del área de cobertura del relevamiento VVV en el cual se indica la ubicación de los 4 blazares del catálogo de Roma BZCAT. 68
- Figura 50 Imágenes $1' \times 1'$ de los 4 blazares en las 5 bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) del relevamiento VVV. Primer panel (de arriba hacia abajo) muestra la imagen del blazar BL Lac 5BZQJ1717-3342; segundo panel el blazar 5BZQJ1731-3003; tercer y cuarto panel imágenes de los blazares FSRQ 5BZQJ1802-3940 y 5BZQJ1823-3454, respectivamente. Norte hacia arriba y Este a la izquierda. 69

- Figura 51 Diagramas Color-Magnitud (panel izquierdo) y Color-Color (panel derecho) de todos los objetos detectados en la región del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940 representados por círculos negros. El blazar se identifica mediante un círculo negro de mayor tamaño. 71
- Figura 52 Diagrama Color-Color utilizando datos del relevamiento VMC extraído del trabajo de Cioni y col. (2013). En el diagrama se representan estrellas de la Gran Nube de Magallanes con círculos llenos de color negro, a los cuásares clasificados como galaxia en cuadros llenos rojos y a los cuásares de tipo estelar mediante triángulos llenos azules. Las líneas cortadas negras dividen a las regiones donde se encuentran los cuásares. 72
- Figura 53 Imagen combinada ($3' \times 3'$) de la región del objeto FSRQ 5BZQJ1802-3940. El QSO (FSRQ 5BZQJ1802-39409) y la fuente de rayos gamma están representados en color blanco por un círculo y una cruz, respectivamente. 73
- Figura 54 Diagrama Color-Color para el blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940. Hay 5 fuentes WISE detectadas, representadas mediante círculos llenos negros, en la región de error de la fuente de rayos gamma y una fuente WISE fue encontrada como contraparte del blazar FSRQ 5BZQJ1802-3940. 74
- Figura 55 Diagrama Color-Color de las fuentes extragalácticas detectadas en el Tile d015. Panel izquierdo: $(H - K_s)$ versus $(J - H)$ de los objetos extragalácticos detectados simultáneamente en 3 bandas (J, H y K_s). En línea sólida se representa la recta $(J - H) + 0.9 (H - K_s) = 0.44$ mag utilizada para eliminar falsas detecciones. Panel derecho: $(Y - J)$ versus $(Z - Y)$ de los objetos que tienen detección simultáneamente en las 5 bandas del relevamiento VVV. 76
- Figura 56 Distribuciones normalizadas de parámetros fotométricos de los candidatos a objetos extragalácticos del Tile d015. Paneles superiores muestran histogramas de la magnitud J y H, y los paneles inferiores la magnitud K_s y el color $(J - K_s)$. Las distribuciones correspondientes a los objetos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) se representan con línea sólida, y con línea cortada se representan las distribuciones correspondientes a aquellos candidatos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s). 77
- Figura 57 Distribuciones normalizadas de parámetros morfológicos de los candidatos a objetos extragalácticos del Tile d015. Paneles superiores muestran histogramas de $R_{1/2}$ y C, y los paneles inferiores de ϵ y n. Las distribuciones correspondientes a los objetos detectados en las 5 bandas (Z, Y, J, H y K_s) se representan con línea sólida, y con línea cortada se representan las distribuciones correspondientes a aquellos candidatos que sólo tienen detección en 3 bandas (J, H y K_s). 78
- Figura 58 Distribución normalizada de la extinción galáctica en la banda K_s en la región de la concentración VVV-J144321.0-611753.9. 80

- Figura 59 Imagen combinada del candidato a cúmulo de galaxias centrada en la galaxia más brillante, VVVJ144321.05-611753.9. La región estudiada abarca una área de 30×30 arcmin² (panel izquierdo). Con círculos en línea cortada se representan las regiones centrales de 3 y 7 minutos de arco de diámetro. El panel derecho muestra una ampliación de la parte más central (3 arcmin de diámetro). Los círculos pequeños blancos representan a las 25 galaxias detectadas en la región del candidato a cúmulo de galaxias. 81
- Figura 60 Imágenes de 1×1 minutos de arco cuadrado en las bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) de los los objetos extragalácticos que pertenecen a la concentración VVV-J144321.0-611753.9 del Tile do15. La cruz blanca identifica al objeto extragaláctico ubicado en el centro de cada imagen. 82
- Figura 61 Imágenes de 1×1 minutos de arco en las bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) de los los objetos extragalácticos que pertenecen a la concentración VVV-J144321.0-611753.9 del Tile do15. La cruz blanca identifica al objeto extragaláctico ubicado en el centro de cada imagen. 83
- Figura 62 Imágenes de 1×1 minutos de arco en las bandas Z, Y, J, H y K_s (de izquierda a derecha) de los los objetos extragalácticos que pertenecen a la concentración VVV-J144321.0-611753.9 del Tile do15. La cruz blanca identifica al objeto extragaláctico ubicado en el centro de cada imagen. 84
- Figura 63 Diagrama Color-Magnitud de las galaxias detectadas en la región donde se encuentra la concentración de galaxias, VVV-J144321.0-611753.9. Los círculos negros representan las galaxias detectadas en la región estudiada y la línea sólida representa el mejor ajuste de la RS y 1σ de la misma. La línea de puntos representa 3σ de la RS. 85
- Figura 64 Diagrama Color-Magnitud (J - K_s) versus K_s de las galaxias del cúmulo Suzaku J1759-3450, extraído del trabajo de Coldwell y col. (2014). La línea sólida representa la RS y en línea cortada 5σ de la misma. Las galaxias están representadas mediante cruces. El mapa de densidad esta relacionado con la cantidad de objetos en la zona central del cúmulo. 86
- Figura 65 Distribución espacial en coordenadas ecuatoriales de los objetos extragalácticos del Tile do15 una vez aplicada la técnica de agrupamiento automático. Los grupos se representan con diferentes símbolos: grupo 1 con cuadrados vacíos; grupo 2 esta representado en círculos llenos; grupo 3 con círculos vacíos y grupo 4 con cuadros vacíos. Las galaxias que forman parte de concentración de galaxias VVV-J144321.0-611753.0 se representan en rombos de color rojo. 88
- Figura 66 Distribuciones del Color (J - K_s) para las diferentes agrupaciones automáticas. 90
- Figura 67 Distribuciones del Color (H - K_s) para las diferentes agrupaciones automáticas. 91

Figura 68	Distribuciones de $R_{1/2}$ para las diferentes agrupaciones automáticas. 92
Figura 69	Distribuciones del índice de concentración para las diferentes agrupaciones automáticas. 93
Figura 70	Distribuciones de la elipticidad para las diferentes agrupaciones automáticas. 94
Figura 71	Distribuciones del índice de Sérsic para las diferentes agrupaciones automáticas. 95
Figura 72	Diagrama Color-Magnitud de las galaxias detectadas en la región donde se encuentra la concentración de galaxias, VVV-J144321.0-611753.9. Los círculos negros representan las galaxias detectadas en la región estudiada y los círculos vacíos mayores aquellas galaxias con espectroscopía. La línea sólida representa el mejor ajuste de la RS y 1σ de la misma. La línea de puntos representa 3σ de la RS. 96
Figura 73	Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC205 extraído de Mason y col. (2015). 97
Figura 74	Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 315 extraído de Mason y col. (2015). 98
Figura 75	Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 2768 extraído de Mason y col. (2015). 98
Figura 76	Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 2832 extraído de Mason y col. (2015). 99
Figura 77	Espectro GNIRS de la galaxia elíptica NGC 410 extraído de Mason y col. (2015). 100
Figura 78	Espectro de dos de las galaxias más brillantes de la concentración obtenido usando F-2 en modo long-slit. 101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características fotométricas del relevamiento VVV. 14
Tabla 2	Movimiento en ascensión recta y declinación del campo de visión del telescopio para formar un Tile. 16
Tabla 3	Parámetros fotométricos de las imágenes correspondientes los Tiles d010 y d115 utilizados para ejecutar SExtractor+PSFEx . 30
Tabla 4	Valores de extinción relativa para los filtros Z, Y, J, H, K_s del relevamiento VVV extraídos del trabajo de Catelan y col. (2011). 44
Tabla 5	Catálogo fotométrico de los candidatos a objetos extragalácticos detectados en los Tiles d010 y d115 del relevamiento VVV. 54
Tabla 6	Medianas de magnitudes, colores y parámetros estructurales de las galaxias confirmadas. 59
Tabla 7	Blazares del catálogo de Roma-BZCAT en el relevamiento VVV. 68

Tabla 8	Parámetros fotométricos de las imágenes correspondientes al Tile b216 utilizados para ejecutar SExtractor+PSFEx	70
Tabla 9	Parámetros fotométricos de las imágenes correspondientes al Tile d015 utilizados para ejecutar SExtractor+PSFEx .	76
Tabla 10	Medianas de colores y parámetros morfológicos para los diferentes grupos de objetos extragalácticos.	89

BIBLIOGRAFÍA

- Abdo, A. A. y col. (2010). «The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars». En: *Astrophys. J.* 716, págs. 30-70. DOI: [10.1088/0004-637X/716/1/30](https://doi.org/10.1088/0004-637X/716/1/30). arXiv: [0912.2040](https://arxiv.org/abs/0912.2040) (vid. pág. 65).
- Acero, F. y col. (2015). «Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog». En: *Astrophys. J. Suppl.* 218, 23, pág. 23. DOI: [10.1088/0067-0049/218/2/23](https://doi.org/10.1088/0067-0049/218/2/23). arXiv: [1501.02003](https://arxiv.org/abs/1501.02003) [astro-ph.HE] (vid. págs. 65-67).
- Ackermann, M. y col. (2012). «A Statistical Approach to Recognizing Source Classes for Unassociated Sources in the First Fermi-LAT Catalog». En: *Astrophys. J.* 753, 83, pág. 83. DOI: [10.1088/0004-637X/753/1/83](https://doi.org/10.1088/0004-637X/753/1/83). arXiv: [1108.1202](https://arxiv.org/abs/1108.1202) [astro-ph.HE] (vid. pág. 65).
- Amôres, E. B. y col. (2012). «Galaxies behind the Galactic Plane: First Results and Perspectives from the VVV Survey». En: 144, 127, pág. 127. DOI: [10.1088/0004-6256/144/5/127](https://doi.org/10.1088/0004-6256/144/5/127). arXiv: [1206.4318](https://arxiv.org/abs/1206.4318) (vid. págs. 7-9, 45-47, 49).
- Andrews, S. K., L. S. Kelvin, S. P. Driver y A. S. G. Robotham (2014). «Detection, Size, Measurement, and Structural Analysis Limits for the 2MASS, UKIDSS-LAS, and VISTA VIKING Surveys». En: *Publications of the Astronomical Society of Australia* 31, e004, e004. DOI: [10.1017/pasa.2013.41](https://doi.org/10.1017/pasa.2013.41). arXiv: [1311.1569](https://arxiv.org/abs/1311.1569) (vid. págs. 61, 63).
- Annunziatella, M., A. Mercurio, M. Brescia, S. Cavuoti y G. Longo (2013). «Inside Catalogs: A Comparison of Source Extraction Software». En: *Pub. Astron. Soc. Pacific* 125, pág. 68. DOI: [10.1086/669333](https://doi.org/10.1086/669333). arXiv: [1212.0564](https://arxiv.org/abs/1212.0564) [astro-ph.IM] (vid. págs. 24, 28, 36, 40, 70).
- Arnaboldi, M., M. J. Neeser, L. C. Parker, P. Rosati, M. Lombardi, J. P. Dietrich y W. Hummel (2007). «ESO Public Surveys with the VST and VISTA». En: *The Messenger* 127 (vid. pág. 7).
- Baravalle, L. D., M. V. Alonso, J. L. Nilo Castellón, J. C. Beamín y D. Minniti (2018). «Searching for Extragalactic Sources in the VISTA Variables in the Vía Láctea Survey». En: *Astron. J.* 155, 46, pág. 46. DOI: [10.3847/1538-3881/aa9ee2](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa9ee2). arXiv: [1712.00041](https://arxiv.org/abs/1712.00041) (vid. págs. 53, 64).
- Barbá, R. H., A. Roman-Lopes, J. L. Nilo Castellón, V. Firpo, D. Minniti, P. Lucas, J. P. Emerson, M. Hempel, M. Soto y R. K. Saito (2015). «Hundreds of new cluster candidates in the VISTA Variables in the Vía Láctea survey DR1». En: *Astron. Astrph.* 581, A120, A120. DOI: [10.1051/0004-6361/201424048](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424048). arXiv: [1505.02764](https://arxiv.org/abs/1505.02764) [astro-ph.SR] (vid. pág. 20).
- Beard, S. M., H. T. MacGillivray y P. F. Thanisch (1990). «The Cosmos System for Crowded-Field Analysis of Digitized Photographic Plate Scans». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 247, pág. 311 (vid. pág. 25).
- Bertin, E. (2011). «Automated Morphometry with SExtractor and PSFEx». En: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*. Ed. por I. N. Evans, A. Accomazzi, D. J. Mink y A. H. Rots. Vol. 442. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 435 (vid. pág. 23).
- Bertin, E. y S. Arnouts (1996). «SExtractor: Software for source extraction.» En: *Astron. Astroph. Supplement (Journal)* 117, págs. 393-404. DOI: [10.1051/aas:1996164](https://doi.org/10.1051/aas:1996164) (vid. pág. 23).

- Bica, E., D. Alloin y A. A. Schmidt (1990). «Star formation history and chemical enrichment in the nuclear regions of M31 and its dwarf companions M32 and NGC205». En: *Astron. Astrph.* 228, págs. 23-36 (vid. pág. 97).
- Binggeli, B., A. Sandage y G. A. Tammann (1985). «Studies of the Virgo Cluster. II - A catalog of 2096 galaxies in the Virgo Cluster area.» En: *Astron. J.* 90, págs. 1681-1759. DOI: [10.1086/113874](https://doi.org/10.1086/113874) (vid. pág. 3).
- Binney, J., O. Gerhard y D. Spergel (1997). «The photometric structure of the inner Galaxy». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 288, págs. 365-374. DOI: [10.1093/mnras/288.2.365](https://doi.org/10.1093/mnras/288.2.365). eprint: [astro-ph/9609066](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9609066) (vid. págs. 2, 3).
- Blandford, R. D. y M. J. Rees (1978). «Some comments on radiation mechanisms in Lacertids». En: *BL Lac Objects*. Ed. por A. M. Wolfe, págs. 328-341 (vid. pág. 66).
- Boggess, N. W. y col. (1992). «The COBE mission - Its design and performance two years after launch». En: *Astrophys. J.* 397, págs. 420-429. DOI: [10.1086/171797](https://doi.org/10.1086/171797) (vid. pág. 2).
- Borgani, S., M. Plionis y V. Kolokotronis (1999). «Cosmological constraints from the clustering properties of the X-ray Brightest Abell-type Cluster sample». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 305, págs. 866-874. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1999.02468.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02468.x). eprint: [astro-ph/9812417](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9812417) (vid. pág. 79).
- Buta, R. J. y M. L. McCall (1999). «The IC 342/Maffei Group Revealed». En: *Astrophys. J. Suppl.* 124, págs. 33-93. DOI: [10.1086/313255](https://doi.org/10.1086/313255) (vid. pág. 41).
- Capetti, A., H. R. de Ruiter, R. Fanti, R. Morganti, P. Parma y M.-H. Ulrich (2000). «The HST snapshot survey of the B2 sample of low luminosity radio-galaxies: a picture gallery». En: *Astron. Astrph.* 362, págs. 871-885. eprint: [astro-ph/0009056](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0009056) (vid. pág. 97).
- Cardelli, J. A., G. C. Clayton y J. S. Mathis (1989). «The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction». En: *Astrophys. J.* 345, págs. 245-256. DOI: [10.1086/167900](https://doi.org/10.1086/167900) (vid. pág. 44).
- Catelan, M. y col. (2011). «The Vista Variables in the Vía Láctea (VVV) ESO Public Survey: Current Status and First Results». En: *RR Lyrae Stars, Metal-Poor Stars, and the Galaxy*. Ed. por A. McWilliam. Vol. 5, pág. 145. arXiv: [1105.1119](https://arxiv.org/abs/1105.1119) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1105.1119)] (vid. págs. 44, 45, 75).
- Chiu, I., S. Desai y J. Liu (2016). «ComEst: A completeness estimator of source extraction on astronomical imaging». En: *Astronomy and Computing* 16, págs. 79-87. DOI: [10.1016/j.ascom.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ascom.2016.04.005). arXiv: [1605.02650](https://arxiv.org/abs/1605.02650) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1605.02650)] (vid. pág. 31).
- Cid Fernandes, R., R. M. González Delgado, H. Schmitt, T. Storchi-Bergmann, L. P. Martins, E. Pérez, T. Heckman, C. Leitherer y D. Schaerer (2004). «The Stellar Populations of Low-Luminosity Active Galactic Nuclei. I. Ground-based Observations». En: *Astrophys. J.* 605, págs. 105-126. DOI: [10.1086/382217](https://doi.org/10.1086/382217). eprint: [astro-ph/0401416](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0401416) (vid. pág. 97).
- Cioni, M.-R. L. y col. (2013). «The VMC Survey. VI. Quasars behind the Magellanic system». En: *aap* 549, A29, A29. DOI: [10.1051/0004-6361/201219696](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219696). arXiv: [1207.2492](https://arxiv.org/abs/1207.2492) (vid. págs. 70-72).
- Cioni, M.-R. y col. (2011). «The VISTA Near-infrared YJKs Public Survey of the Magellanic Clouds System (VMC)». En: *The Messenger* 144, págs. 25-31 (vid. págs. 12, 104).
- Coldwell, G., S. Alonso, F. Duplancic, M. Hempel, V. D. Ivanov y D. Minniti (2014). «Confirmation of a galaxy cluster hidden behind the Galactic bulge using the VVV survey». En: *Astron. Astrph.* 569, A49, A49. DOI: [10.1051/0004-6361/201423464](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423464). arXiv: [1407.0262](https://arxiv.org/abs/1407.0262) (vid. págs. 8, 10, 85, 86).

- Colless, M. y col. (2001). «The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectra and redshifts». En: *mnras* 328, págs. 1039-1063. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2001.04902.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04902.x). eprint: [astro-ph/0106498](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0106498) (vid. pág. 6).
- Conselice, C. J. (1997). «The Symmetry, Color, and Morphology of Galaxies». En: *Pub. Astron. Soc. Pacific* 109, págs. 1251-1255. DOI: [10.1086/134004](https://doi.org/10.1086/134004). eprint: [astro-ph/9710234](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710234) (vid. pág. 64).
- Conselice, C. J., M. A. Bershadsky y A. Jangren (2000). «The Asymmetry of Galaxies: Physical Morphology for Nearby and High-Redshift Galaxies». En: *Astrophys. J.* 529, págs. 886-910. DOI: [10.1086/308300](https://doi.org/10.1086/308300). eprint: [astro-ph/9907399](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9907399) (vid. págs. 28, 63, 64).
- Crocker, A. F., M. Bureau, L. M. Young y F. Combes (2008). «The molecular polar disc in NGC 2768». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 386, págs. 1811-1820. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13177.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13177.x). arXiv: [0803.0426](https://arxiv.org/abs/0803.0426) (vid. pág. 97).
- D'Abrusco, R., F. Massaro, M. Ajello, J. E. Grindlay, H. A. Smith y G. Tosti (2012). «Infrared Colors of the Gamma-Ray-detected Blazars». En: *Astrophys. J.* 748, 68, pág. 68. DOI: [10.1088/0004-637X/748/1/68](https://doi.org/10.1088/0004-637X/748/1/68). arXiv: [1203.0568](https://arxiv.org/abs/1203.0568) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE)] (vid. pág. 66).
- Dalton, G. B. y col. (2006). «The VISTA infrared camera». En: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Vol. 6269. Proceedings of the International Society for Optical, pág. 62690X. DOI: [10.1117/12.670018](https://doi.org/10.1117/12.670018) (vid. págs. 12, 14).
- Dehnen, W. y J. Binney (1998). «Mass models of the Milky Way». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 294, pág. 429. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01282.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01282.x). eprint: [astro-ph/9612059](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9612059) (vid. pág. 3).
- Depoy, D. L., B. Atwood, P. L. Byard, J. Frogel y T. P. O'Brien (1993). «Ohio State Infrared Imager/Spectrometer (OSIRIS)». En: *Infrared Detectors and Instrumentation*. Ed. por A. M. Fowler. Vol. 1946. Proceedings of the International Society for Optical, págs. 667-672. DOI: [10.1117/12.158725](https://doi.org/10.1117/12.158725) (vid. pág. 105).
- Desai, S. y col. (2012). «The Blanco Cosmology Survey: Data Acquisition, Processing, Calibration, Quality Diagnostics, and Data Release». En: *Astrophys. J.* 757, 83, pág. 83. DOI: [10.1088/0004-637X/757/1/83](https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/83). arXiv: [1204.1210](https://arxiv.org/abs/1204.1210) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/abs/astro-ph.CO)] (vid. págs. 27, 36, 70).
- Dressler, A. (1980). «Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies». En: *Astrophys. J.* 236, págs. 351-365. DOI: [10.1086/157753](https://doi.org/10.1086/157753) (vid. pág. 79).
- Durret, F. y col. (2011). «Galaxy cluster searches based on photometric redshifts in the four CFHTLS Wide fields». En: *Astron. Astrph.* 535, A65, A65. DOI: [10.1051/0004-6361/201116985](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116985). arXiv: [1109.0850](https://arxiv.org/abs/1109.0850) (vid. pág. 24).
- Edge, A., W. Sutherland, K. Kuijken, S. Driver, R. McMahan, S. Eales y J. P. Emerson (2013). «The VISTA Kilo-degree Infrared Galaxy (VIKING) Survey: Bridging the Gap between Low and High Redshift». En: *The Messenger* 154, págs. 32-34 (vid. pág. 12).
- Elias, J. H., R. R. Joyce, M. Liang, G. P. Muller, E. A. Hileman y J. R. George (2006). «Design of the Gemini near-infrared spectrograph». En: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Vol. 6269. Proceedings of the International Society for Optical, pág. 62694C. DOI: [10.1117/12.671817](https://doi.org/10.1117/12.671817) (vid. pág. 96).
- Emerson, J., A. McPherson y W. Sutherland (2006). «Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy: Progress Report». En: *The Messenger* 126, págs. 41-42 (vid. pág. 12).

- Falomo, R., E. Pian y A. Treves (2014). «An optical view of BL Lacertae objects». En: *Astronomy & Astrophysics Reviews* 22, 73, pág. 73. DOI: [10.1007/s00159-014-0073-z](https://doi.org/10.1007/s00159-014-0073-z). arXiv: [1407.7615](https://arxiv.org/abs/1407.7615) [astro-ph.HE] (vid. pág. 66).
- Fitzpatrick, E. L. (1999). «Correcting for the Effects of Interstellar Extinction». En: *Pub. Astron. Soc. Pacific* 111, págs. 63-75. DOI: [10.1086/316293](https://doi.org/10.1086/316293). eprint: [astro-ph/9809387](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9809387) (vid. pág. 44).
- Geller, M. J. y J. P. Huchra (1989). «The Center for Astrophysics Redshift Survey - Recent results». En: *Large Scale Structure and Motions in the Universe*. Ed. por M. Mezzetti, G. Giuricin, F. Mardirossian y M. Ramella. Vol. 151. Astrophysics and Space Science Library, págs. 3-17. DOI: [10.1007/978-94-009-0903-8_1](https://doi.org/10.1007/978-94-009-0903-8_1) (vid. pág. 6).
- Genovali, K. y col. (2014). «On the fine structure of the Cepheid metallicity gradient in the Galactic thin disk». En: *Astron. Astrph.* 566, A37, A37. DOI: [10.1051/0004-6361/201323198](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323198). arXiv: [1403.6128](https://arxiv.org/abs/1403.6128) (vid. pág. 3).
- Ghisellini, G., L. Maraschi y A. Treves (1985). «Inhomogeneous synchrotron-self-Compton models and the problem of relativistic beaming of BL Lac objects». En: *Astron. Astrph.* 146, págs. 204-212 (vid. pág. 66).
- González Delgado, R. M., C. Leitherer y T. M. Heckman (1999). «Synthetic Spectra of H Balmer and HE I Absorption Lines. II. Evolutionary Synthesis Models for Starburst and Poststarburst Galaxies». En: *Astrophys. J. Suppl.* 125, págs. 489-509. DOI: [10.1086/313285](https://doi.org/10.1086/313285). eprint: [astro-ph/9907116](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9907116) (vid. pág. 97).
- González-Fernández, C., S. T. Hodgkin, M. J. Irwin, E. González-Solares, S. E. Koposov, J. R. Lewis, J. P. Emerson, P. C. Hewett, A. K. Yoldaş y M. Riello (2018). «The VISTA ZYJHKs photometric system: calibration from 2MASS». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 474, págs. 5459-5478. DOI: [10.1093/mnras/stx3073](https://doi.org/10.1093/mnras/stx3073). arXiv: [1711.08805](https://arxiv.org/abs/1711.08805) [astro-ph.IM] (vid. págs. 31, 33).
- Gray, M. E. y col. (2009). «STAGES: the Space Telescope A901/2 Galaxy Evolution Survey». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 393, págs. 1275-1301. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.14259.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14259.x). arXiv: [0811.3890](https://arxiv.org/abs/0811.3890) (vid. pág. 61).
- Henning, P. A., R. C. Kraan-Korteweg y L. Staveley-Smith (2005). «The HI Parkes Deep Zone of Avoidance Survey». En: *Nearby Large-Scale Structures and the Zone of Avoidance*. Ed. por A. P. Fairall y P. A. Woudt. Vol. 329. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Fairall. eprint: [astro-ph/0406517](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0406517) (vid. pág. 7).
- Hiemer, A., M. Barden, L. S. Kelvin, B. Häußler y S. Schindler (2014). «GALAPAGOS-C: analysis of galaxy morphologies using high-performance computing methods». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 444, págs. 3089-3117. DOI: [10.1093/mnras/stu1649](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1649) (vid. pág. 61).
- Ho, L. C. (1996). «A Spectroscopic Survey of Nearby Galactic Nuclei». En: *Pub. Astron. Soc. Pacific* 108, pág. 637. DOI: [10.1086/133777](https://doi.org/10.1086/133777) (vid. pág. 96).
- Huchra, J. P. y col. (2012). «The 2MASS Redshift Survey Description and Data Release». En: *Astrophys. J. Suppl.* 199, 26, pág. 26. DOI: [10.1088/0067-0049/199/2/26](https://doi.org/10.1088/0067-0049/199/2/26). arXiv: [1108.0669](https://arxiv.org/abs/1108.0669) (vid. pág. 6).
- Hudson, M. J., J. R. Lucey, R. J. Smith, D. J. Schlegel y R. L. Davies (2001). «Streaming motions of galaxy clusters within 12 000 km s⁻¹ - III. A standardized catalogue of Fundamental Plane data». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 327, págs. 265-295. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2001.04786.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04786.x) (vid. pág. 99).
- Jarrett, T. H., T. Chester, R. Cutri, S. Schneider, M. Skrutskie y J. P. Huchra (2000a). «2MASS Extended Source Catalog: Overview and Algorithms». En: *Astron. J.* 119, págs. 2498-2531. DOI: [10.1086/301330](https://doi.org/10.1086/301330). eprint: [astro-ph/0004318](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0004318) (vid. págs. 5, 6, 45, 46, 48, 49).

- Jarrett, T.-H., T. Chester, R. Cutri, S. Schneider, J. Rosenberg, J. P. Huchra y J. Mader (200b). «2MASS Extended Sources in the Zone of Avoidance». En: *Astron. J.* 120, págs. 298-313. DOI: [10.1086/301426](https://doi.org/10.1086/301426). eprint: [astro-ph/0005017](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0005017) (vid. págs. 5, 45, 46, 49).
- Jarrett, T. (2004). «Large Scale Structure in the Local Universe - The 2MASS Galaxy Catalog». En: *Publications of the Astronomical Society of Australia* 21, págs. 396-403. DOI: [10.1071/AS04050](https://doi.org/10.1071/AS04050). eprint: [astro-ph/0405069](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0405069) (vid. págs. 5, 7).
- Jarvis, M. J. y col. (2013). «The VISTA Deep Extragalactic Observations (VIDEO) survey». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 428, págs. 1281-1295. DOI: [10.1093/mnras/sts118](https://doi.org/10.1093/mnras/sts118). arXiv: [1206.4263](https://arxiv.org/abs/1206.4263) (vid. pág. 13).
- Jones, D. H. y col. (2009). «The 6dF Galaxy Survey: final redshift release (DR3) and southern large-scale structures». En: *mnras* 399, págs. 683-698. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15338.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15338.x). arXiv: [0903.5451](https://arxiv.org/abs/0903.5451) (vid. pág. 6).
- Kelvin, L. S. y col. (2012). «Galaxy And Mass Assembly (GAMA): Structural Investigation of Galaxies via Model Analysis». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 421, págs. 1007-1039. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.20355.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20355.x). arXiv: [1112.1956](https://arxiv.org/abs/1112.1956) (vid. pág. 61).
- Kilborn, V. A. y col. (2002). «A Catalog of H I-Selected Galaxies from the South Celestial Cap Region of Sky». En: *Astron. J.* 124, págs. 690-705. DOI: [10.1086/341582](https://doi.org/10.1086/341582) (vid. pág. 18).
- Kraan-Korteweg, R. C. (2000). «A catalog of galaxies behind the Southern Milky Way . I. The Hydra/Antlia extension ($l \sim 266^{\circ}$ - 296°)». En: *Astron. Astroph. Supplement (Journal)* 141, págs. 123-140. DOI: [10.1051/aas:2000314](https://doi.org/10.1051/aas:2000314). eprint: [astro-ph/9910455](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9910455) (vid. pág. 4).
- Kraan-Korteweg, R. C. y P. A. Woudt (1999). «Overview of Uncovered and Suspected Large-scale Structures behind the Milky Way». En: *Publications of the Astronomical Society of Australia* 16, págs. 53-59. DOI: [10.1071/AS99053](https://doi.org/10.1071/AS99053). eprint: [astro-ph/9901419](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9901419) (vid. pág. 4).
- Kraan-Korteweg, R. C., M. E. Cluver, M. Bilicki, T. H. Jarrett, M. Colless, A. Elagali, H. Böhringer y G. Chon (2017). «Discovery of a supercluster in the Zone of Avoidance in Vela». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 466, págs. L29-L33. DOI: [10.1093/mnrasl/slw229](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slw229). arXiv: [1611.04615](https://arxiv.org/abs/1611.04615) (vid. pág. 5).
- Kron, R. G. (1980). «Photometry of a complete sample of faint galaxies». En: *Astrophys. J. Suppl.* 43, págs. 305-325. DOI: [10.1086/190669](https://doi.org/10.1086/190669) (vid. págs. 26, 36).
- Lauer, T. R. (1988). «The morphology of multiple-nucleus brightest cluster galaxies». En: *Astrophys. J.* 325, págs. 49-73. DOI: [10.1086/165982](https://doi.org/10.1086/165982) (vid. pág. 99).
- Lawrence, A. y col. (2007). «The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS)». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 379, págs. 1599-1617. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.12040.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12040.x). eprint: [astro-ph/0604426](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0604426) (vid. pág. 6).
- Liang, E. W. y H. T. Liu (2003). «The masses of central supermassive black holes and the variability time-scales in gamma-ray loud blazars». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 340, págs. 632-638. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06327.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06327.x) (vid. pág. 71).
- Lynden-Bell, D. y O. Lahav (1988). «Whence arises the local flow of galaxies?» En: *Large-Scale Motions in the Universe: A Vatican study Week*. Ed. por V. C. Rubin y G. V. Coyne, págs. 199-217 (vid. pág. 4).
- Mason, R. E. y col. (2015). «The Nuclear Near-Infrared Spectral Properties of Nearby Galaxies». En: *Astrophys. J. Suppl.* 217, 13, pág. 13. DOI: [10.1088/0067-0049/217/1/13](https://doi.org/10.1088/0067-0049/217/1/13). arXiv: [1503.01836](https://arxiv.org/abs/1503.01836) (vid. págs. 96-100).

- Massaro, E., P. Giommi, C. Leto, P. Marchegiani, A. Maselli, M. Perri, S. Piranomonte y S. Sclavi (2009). «Roma-BZCAT: a multifrequency catalogue of blazars». En: *Astron. Astrph.* 495, págs. 691-696. DOI: [10.1051/0004-6361:200810161](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810161). arXiv: [0810.2206](https://arxiv.org/abs/0810.2206) (vid. pág. 67).
- Massaro, F., R. D'Abrusco, M. Ajello, J. E. Grindlay y H. A. Smith (2011). «Identification of the Infrared Non-thermal Emission in Blazars». En: *Astrophys. J. Let.* 740, L48, pág. L48. DOI: [10.1088/2041-8205/740/2/L48](https://doi.org/10.1088/2041-8205/740/2/L48). arXiv: [1203.0304](https://arxiv.org/abs/1203.0304) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/hep)] (vid. pág. 66).
- Massaro, F., R. D'Abrusco, G. Tosti, M. Ajello, A. Paggi y D. Gasparri (2012). «Unidentified γ -Ray Sources: Hunting γ -Ray Blazars». En: *Astrophys. J.* 752, 61, pág. 61. DOI: [10.1088/0004-637X/752/1/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/752/1/61). arXiv: [1203.3801](https://arxiv.org/abs/1203.3801) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/hep)] (vid. pág. 66).
- Mauro, F., C. Moni Bidin, A.-N. Chené, D. Geisler, J. Alonso-García, J. Borissova y G. Carraro (2013). «The VVV-SkZ_pipeline: an automatic PSF-fitting photometric pipeline for the VVV survey». En: *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* 49, págs. 189-207. arXiv: [1303.1824](https://arxiv.org/abs/1303.1824) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/archive/hep)] (vid. pág. 24).
- McCracken, H. J. y col. (2010). «The COSMOS-WIRCAM Near-Infrared Imaging Survey. I. BzK-Selected Passive and Star-Forming Galaxy Candidates at $z_{\text{gsim}} 1.4$ ». En: *Astrophys. J.* 708, págs. 202-217. DOI: [10.1088/0004-637X/708/1/202](https://doi.org/10.1088/0004-637X/708/1/202). arXiv: [0910.2705](https://arxiv.org/abs/0910.2705) (vid. pág. 12).
- McCracken, H. J. y col. (2013). «UltraVISTA: A VISTA Public Survey of the Distant Universe». En: *The Messenger* 154, págs. 29-31 (vid. pág. 12).
- McIntyre, T. P., P. A. Henning, R. F. Minchin, E. Momjian y Z. Butcher (2015). «The ALFA ZOA Deep Survey: First Results». En: *Astron. J.* 150, 28, pág. 28. DOI: [10.1088/0004-6256/150/1/28](https://doi.org/10.1088/0004-6256/150/1/28). arXiv: [1506.07143](https://arxiv.org/abs/1506.07143) (vid. pág. 4).
- McMahon, R. G., M. Banerji, E. Gonzalez, S. E. Kuposov, V. J. Bejar, N. Lodieu, R. Rebolo y VHS Collaboration (2013). «First Scientific Results from the VISTA Hemisphere Survey (VHS)». En: *The Messenger* 154, págs. 35-37 (vid. pág. 13).
- Minniti, D. (2018). «Mapping the Milky Way in the Near-IR: The Future of the VVV Survey». En: *The Vatican Observatory, Castel Gandolfo: 80th Anniversary Celebration* 51, pág. 63. DOI: [10.1007/978-3-319-67205-2_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-67205-2_4) (vid. pág. 17).
- Minniti, D. y col. (2010). «VISTA Variables in the Via Lactea (VVV): The public ESO near-IR variability survey of the Milky Way». En: *New Astronom.* 15, págs. 433-443. DOI: [10.1016/j.newast.2009.12.002](https://doi.org/10.1016/j.newast.2009.12.002). arXiv: [0912.1056](https://arxiv.org/abs/0912.1056) (vid. págs. 7, 12-14).
- Mitton, J. (1993). «HIPPARCOS - Mission Accomplished». En: *Journal of the British Astronomical Association* 103, pág. 281 (vid. pág. 3).
- Mori, H., Y. Maeda, A. Furuzawa, Y. Haba e Y. Ueda (2013). «A New Cluster of Galaxies Towards the Galactic Bulge, Suzaku J1759-3450». En: *Pub. Astron. Soc. Jap.* 65, 102, pág. 102. DOI: [10.1093/pasj/65.5.102](https://doi.org/10.1093/pasj/65.5.102). arXiv: [1306.1382](https://arxiv.org/abs/1306.1382) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/hep)] (vid. pág. 8).
- Nagar, N. M., H. Falcke y A. S. Wilson (2005). «Radio sources in low-luminosity active galactic nuclei. IV. Radio luminosity function, importance of jet power, and radio properties of the complete Palomar sample». En: *Astron. Astrph.* 435, págs. 521-543. DOI: [10.1051/0004-6361:20042277](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20042277). eprint: [astro-ph/0502551](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0502551) (vid. pág. 97).
- Nilo Castellón, J. L., M. V. Alonso, D. García Lambas, A. L. O'Mill, C. Valotto, E. R. Carrasco, H. Cuevas y A. Ramírez (2014). «Low X-ray luminosity galaxy clusters - II. Optical properties and morphological content at $0.18 < z < 0.70$ ». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 437, págs. 2607-2620. DOI: [10.1093/mnras/stt2072](https://doi.org/10.1093/mnras/stt2072). arXiv: [1311.0788](https://arxiv.org/abs/1311.0788) (vid. pág. 24).

- Nilson, P. (1995). «VizieR Online Data Catalog: Uppsala General Catalogue of Galaxies (UGC) (Nilson 1973)». En: *VizieR Online Data Catalog* 7026 (vid. pág. 6).
- Nord, M. E., C. L. Brogan, S. D. Hyman, T. J. W. Lazio, N. E. Kassim, T. N. Laroza, K. Anantharamaiah y N. Duric (2003). «High Resolution, High Sensitivity Imaging of the Galactic Center at 330 MHz». En: *Astronomische Nachrichten Supplement* 324, págs. 9-16. DOI: [10.1002/asna.200385077](https://doi.org/10.1002/asna.200385077) (vid. pág. 2).
- Pantoja, C. A., D. R. Altschuler, C. Giovanardi y R. Giovanelli (1997). «21-cm Line Observations of Galaxies in the Zone of Avoidance». En: *Astron. J.* 113, págs. 905-936. DOI: [10.1086/118310](https://doi.org/10.1086/118310) (vid. pág. 4).
- Proctor, R. N. y A. E. Sansom (2002). «A comparison of stellar populations in galaxy spheroids across a wide range of Hubble types». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 333, págs. 517-543. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2002.05391.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05391.x). eprint: [astro-ph/0202390](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0202390) (vid. pág. 99).
- Ramatsoku, M., M. A. W. Verheijen, R. C. Kraan-Korteweg, G. I. G. Józsa, A. C. Schröder, T. H. Jarrett, E. C. Elson, W. van Driel, W. J. G. de Blok y P. A. Henning (2016). «The WSRT ZoA Perseus-Pisces filament wide-field H I imaging survey - I. H I catalogue and atlas». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 460, págs. 923-941. DOI: [10.1093/mnras/stw968](https://doi.org/10.1093/mnras/stw968). arXiv: [1605.02603](https://arxiv.org/abs/1605.02603) (vid. pág. 4).
- Rattenbury, N. J., S. Mao, V. P. Debattista, T. Sumi, O. Gerhard y F. de Lorenzi (2007). «Proper motion dispersions of red clump giants in the galactic bulge: observations and model comparisons». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 378, págs. 1165-1176. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11851.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11851.x). arXiv: [0704.1619](https://arxiv.org/abs/0704.1619) (vid. pág. 3).
- Rieke, G. H. y M. J. Lebofsky (1985). «The interstellar extinction law from 1 to 13 microns». En: *Astrophys. J.* 288, págs. 618-621. DOI: [10.1086/162827](https://doi.org/10.1086/162827) (vid. pág. 44).
- Rowe, B. T. P. y col. (2015). «GALSIM: The modular galaxy image simulation toolkit». En: *Astronomy and Computing* 10, págs. 121-150. DOI: [10.1016/j.ascom.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ascom.2015.02.002). arXiv: [1407.7676](https://arxiv.org/abs/1407.7676) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1407.7676)] (vid. pág. 31).
- Said, K., R. C. Kraan-Korteweg, L. Staveley-Smith, W. L. Williams, T. H. Jarrett y C. M. Springob (2016a). «NIR Tully-Fisher in the Zone of Avoidance - II. 21 cm H I-line spectra of southern ZOA galaxies». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 457, págs. 2366-2376. DOI: [10.1093/mnras/stw105](https://doi.org/10.1093/mnras/stw105). arXiv: [1601.07162](https://arxiv.org/abs/1601.07162) (vid. pág. 7).
- Said, K., R. C. Kraan-Korteweg, T. H. Jarrett, L. Staveley-Smith y W. L. Williams (2016b). «NIR Tully-Fisher in the Zone of Avoidance - III. Deep NIR catalogue of the HIZOA galaxies». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 462, págs. 3386-3400. DOI: [10.1093/mnras/stw1887](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1887). arXiv: [1607.08596](https://arxiv.org/abs/1607.08596) (vid. págs. 7, 58, 60, 62).
- Saito, R. K. y col. (2012). «Milky Way demographics with the VVV survey. I. The 84-million star colour-magnitude diagram of the Galactic bulge». En: *Astron. Astroph.* 544, A147, A147. DOI: [10.1051/0004-6361/201219448](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219448). arXiv: [1208.5178](https://arxiv.org/abs/1208.5178) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1208.5178)] (vid. págs. 14, 15, 18, 31, 33).
- Schlafly, E. F. y D. P. Finkbeiner (2011). «Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD». En: *Astrophys. J.* 737, 103, pág. 103. DOI: [10.1088/0004-637X/737/2/103](https://doi.org/10.1088/0004-637X/737/2/103). arXiv: [1012.4804](https://arxiv.org/abs/1012.4804) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1012.4804)] (vid. págs. 19, 20, 44, 45, 75).
- Schlawin, E. y col. (2014). «Design updates and status of the fourth generation TripleSpec spectrograph». En: *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*. Vol. 9147. Proceedings of the International Society for Optical, 91472H. DOI: [10.1117/12.2055233](https://doi.org/10.1117/12.2055233) (vid. pág. 105).

- Schlegel, D. J., D. P. Finkbeiner y M. Davis (1998). «Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds». En: *Astrophys. J.* 500, págs. 525-553. DOI: [10.1086/305772](https://doi.org/10.1086/305772). eprint: [astro-ph/9710327](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710327) (vid. pág. 44).
- Scrucca, Luca, Michael Fop, Thomas Brendan Murphy y Adrian E. Raftery (2016). «mclust 5: clustering, classification and density estimation using Gaussian finite mixture models». En: *The R Journal* 8.1, págs. 205-233 (vid. pág. 87).
- Sersic, J. L. (1968). *Atlas de galaxias australes* (vid. pág. 28).
- Shapley, H. (1961). *Galaxies*. (Vid. pág. 4).
- Shectman, S. A., S. D. Landy, A. Oemler, D. L. Tucker, H. Lin, R. P. Kirshner y P. L. Schechter (1996). «The Las Campanas Redshift Survey». En: *apj* 470, pág. 172. DOI: [10.1086/177858](https://doi.org/10.1086/177858). eprint: [astro-ph/9604167](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9604167) (vid. pág. 6).
- Skelton, R. E., P. A. Woudt y R. C. Kraan-Korteweg (2009). «The Norma cluster (ACO3627) - II. The near-infrared K_s-band luminosity function». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 396, págs. 2367-2378. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.14905.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14905.x). arXiv: [0904.3485](https://arxiv.org/abs/0904.3485) (vid. págs. 41, 42).
- Skrutskie, M. F. y col. (2006). «The Two Micron All Sky Survey (2MASS)». En: *Astron. J.* 131, págs. 1163-1183. DOI: [10.1086/498708](https://doi.org/10.1086/498708) (vid. págs. 5, 13).
- Sorce, J. G., S. Gottlöber, Y. Hoffman y G. Yepes (2016). «How did the Virgo cluster form?» En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 460, págs. 2015-2024. DOI: [10.1093/mnras/stw1085](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1085). arXiv: [1605.06756](https://arxiv.org/abs/1605.06756) (vid. pág. 3).
- Sorce, J. G., M. Colless, R. C. Kraan-Korteweg y S. Gottlöber (2017). «Predicting structures in the Zone of Avoidance». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 471, págs. 3087-3097. DOI: [10.1093/mnras/stx1800](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1800). arXiv: [1707.04267](https://arxiv.org/abs/1707.04267) (vid. pág. 4).
- Staveley-Smith, L., R. C. Kraan-Korteweg, A. C. Schröder, P. A. Henning, B. S. Koribalski, I. M. Stewart y G. Heald (2016). «The Parkes H I Zone of Avoidance Survey». En: *Astron. J.* 151, 52, pág. 52. DOI: [10.3847/0004-6256/151/3/52](https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/3/52). arXiv: [1602.02922](https://arxiv.org/abs/1602.02922) (vid. págs. 4, 18, 52).
- Stetson, P. B. (1987). «DAOPHOT - A computer program for crowded-field stellar photometry». En: *Pub. Astron. Soc. Pacific* 99, págs. 191-222. DOI: [10.1086/131977](https://doi.org/10.1086/131977) (vid. pág. 23).
- Stetson, P. B. (1994). «Reduction of WFPC Images with DAOPHOT III». En: *Calibrating Hubble Space Telescope*. Ed. por J. C. Blades y S. J. Osmer, pág. 89 (vid. pág. 23).
- Taylor, R., J. I. Davies, R. Auld y R. F. Minchin (2012). «The Arecibo Galaxy Environment Survey - V. The Virgo cluster (I)». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 423, págs. 787-810. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.20914.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20914.x). arXiv: [1203.3094](https://arxiv.org/abs/1203.3094) (vid. pág. 3).
- Tody, D. (1993). «IRAF in the Nineties». En: *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*. Ed. por R. J. Hanisch, R. J. V. Brissenden y J. Barnes. Vol. 52. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 173 (vid. pág. 41).
- Torres-Flores, S., R. Barbá, J. Maíz Apellániz, M. Rubio, G. Bosch, V. Hénault-Brunet y C. J. Evans (2013). «Studying the kinematics of the giant star-forming region 30 Doradus . I. The data». En: *Astron. Astrph.* 555, A60, A60. DOI: [10.1051/0004-6361/201220474](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220474). arXiv: [1305.0042](https://arxiv.org/abs/1305.0042) (vid. pág. 3).
- Trumpler, R. J. (1930). «Absorption of Light in the Galactic System». En: *Pub. Astron. Soc. Pacific* 42, pág. 214. DOI: [10.1086/124039](https://doi.org/10.1086/124039) (vid. pág. 43).
- Tully, R. B. y J. R. Fisher (1977). «A new method of determining distances to galaxies». En: *Astron. Astrph.* 54, págs. 661-673 (vid. pág. 7).
- Tully, R. B. y J. R. Fisher (1988). *Catalog of Nearby Galaxies* (vid. pág. 6).

- Tully, R. B., H. Courtois, Y. Hoffman y D. Pomarède (2014). «The Laniakea super-cluster of galaxies». En: *Nature* 513, págs. 71-73. DOI: [10.1038/nature13674](https://doi.org/10.1038/nature13674). arXiv: [1409.0880](https://arxiv.org/abs/1409.0880) (vid. págs. 3, 6).
- Varela, J. y col. (2009). «WINGS: A Wide-field Nearby Galaxy-cluster Survey. II. Deep optical photometry of 77 nearby clusters». En: *Astron. Astrph.* 497, págs. 667-676. DOI: [10.1051/0004-6361/200809876](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200809876). arXiv: [0902.0612](https://arxiv.org/abs/0902.0612) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/archive/astro-ph)] (vid. pág. 24).
- Visvanathan, N. y A. Sandage (1977). «The color-absolute magnitude relation for E and So galaxies. I - Calibration and tests for universality using Virgo and eight other nearby clusters». En: *Astrophys. J.* 216, págs. 214-226. DOI: [10.1086/155464](https://doi.org/10.1086/155464) (vid. pág. 81).
- Whitmore, B. C., D. M. Gilmore y C. Jones (1993). «What determines the morphological fractions in clusters of galaxies?» En: *Astrophys. J.* 407, págs. 489-509. DOI: [10.1086/172531](https://doi.org/10.1086/172531) (vid. pág. 79).
- Williams, W. L., R. C. Kraan-Korteweg y P. A. Woudt (2014). «Deep NIR photometry of H I galaxies in the Zone of Avoidance». En: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 443, págs. 41-57. DOI: [10.1093/mnras/stu1155](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1155). arXiv: [1406.5918](https://arxiv.org/abs/1406.5918) (vid. págs. 7, 41, 42, 58, 61).
- Woudt, P. A. y R. C. Kraan-Korteweg (2001). «A catalogue of galaxies behind the southern Milky Way. II. The Crux and Great Attractor regions ($l \sim 289^\circ$ to 338°)». En: *Astron. Astrph.* 380, págs. 441-459. DOI: [10.1051/0004-6361:20011455](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011455). eprint: [astro-ph/0110464](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0110464) (vid. pág. 4).
- Wright, E. L. y col. (2010). «The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance». En: *Astron. J.* 140, 1868-1881, págs. 1868-1881. DOI: [10.1088/0004-6256/140/6/1868](https://doi.org/10.1088/0004-6256/140/6/1868). arXiv: [1008.0031](https://arxiv.org/abs/1008.0031) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/archive/astro-ph)] (vid. pág. 65).
- Yasuda, N. y col. (2001). «Galaxy Number Counts from the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data». En: *Astron. J.* 122, págs. 1104-1124. DOI: [10.1086/322093](https://doi.org/10.1086/322093). eprint: [astro-ph/0105545](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0105545) (vid. pág. 28).
- Yee, H. K. C., M. D. Gladders y O. López-Cruz (1999). «The Color-Magnitude Relation of Early-Type Galaxies: A Tool for Cluster Finding and Redshift Determination». En: *Photometric Redshifts and the Detection of High Redshift Galaxies*. Ed. por R. Weymann, L. Storrie-Lombardi, M. Sawicki y R. Brunner. Vol. 191. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 166. eprint: [astro-ph/9908001](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9908001) (vid. págs. 79, 81, 85).
- York, D. G. y col. (2000). «The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary». En: *Astron. J.* 120, págs. 1579-1587. DOI: [10.1086/301513](https://doi.org/10.1086/301513). eprint: [astro-ph/0006396](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006396) (vid. págs. 6, 44).
- Zwicky, F. y et al. (1996). «VizieR Online Data Catalog: Zwicky Galaxy Catalog (Zwicky+ 1968)». En: *VizieR Online Data Catalog* 7190 (vid. pág. 97).
- van den Bergh, S. (2000). «Updated Information on the Local Group». En: *Pub. Astron. Soc. Pacific* 112, págs. 529-536. DOI: [10.1086/316548](https://doi.org/10.1086/316548). eprint: [astro-ph/0001040](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0001040) (vid. pág. 3).