



VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
DIRECCIÓN DE POSTGRADOS Y POSTÍTULOS

FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y ASTRONOMÍA

**Estructuras Extragalácticas Filamentales tras la
Vía Láctea en la dirección del cúmulo de Norma**

Tesis presentada para optar al Grado Académico de Magíster en Astronomía.
--

AUTOR: FERNANDA PAZ MILLA CASTRO

LA SERENA, CHILE, ABRIL 2021

CONSTANCIA

Don

HACE CONSTAR:

Que el trabajo correspondiente a la presente Tesis de Magíster, titulada “Relevamiento Vista Variables en la Vía Láctea y la Gran Estructura de Universo”, ha sido realizada por Doña Fernanda Paz Milla Castro, bajo mi dirección.

Para que conste y en cumplimiento de las normativas vigentes de la Universidad de la Serena, Chile, firmo el presente documento en La Serena, Chile, Abril de 2021

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN ASTRO-
NOMÍA**

TÍTULO : ESTRUCTURAS EXTRAGALÁCTICAS
FILAMENTALES TRAS LA VÍA LÁCTEA EN
LA DIRECCIÓN DEL CÚMULO DE NORMA

PRESENTADA POR : FERNANDA PAZ MILLA CASTRO

DIRECTOR DE TESIS : JOSÉ LUIS NILO CASTELLÓN

TRIBUNAL CALIFICADOR

El tribunal de tesis, conformado por:

PRESIDENTE :

MIEMBROS DEL TRIBUNAL: *

*

*

ACUERDAN OTORGARLE LA CALIFICACIÓN DE:

La Serena, Chile, **Abril de 2021**

*“I wish it need not have happened in my time,” said Frodo.
“So do I,” said Gandalf, “... and so do all who live to see
such times. But that is not for them to decide. All we have
to decide is what to do with the time that is given us.”*

J.R.R. Tolkien - The Fellowship of the Ring

AGRADECIMIENTOS

Escribir esta tesis fue toda la travesía. Agradezco a toda la gente que me acompañó durante estos largos años. En primer lugar a mi esposo Lucas, mi familia y el amor de mi vida. Gracias por mantenerte firme a mi lado aunque en muchas oportunidades el camino parecía más oscuro y sinuoso de lo que era en realidad; por darme aliento para seguir luchando por mis sueños y apoyarme para que pudiera finalizar esta etapa de mi vida (aunque inmediatamente empezó otro postgrado, así que por eso no se notó, jajaja). Agradezco a mis padres que siempre estuvieron incentivándome el amor por la ciencia y los estudios. Sin ustedes no hubiera tenido los cimientos necesarios para dedicarme con motivación a lo que hago hoy en día. Agradezco a mis hermanos también, a todos ellos, porque tengo muchos. Los amo infinitamente, y espero que sigan sus sueños así como yo también seguí los míos. A mis suegros y mis cuñadas por abrir las puertas de su casa para mí, darme amor y ayudarme a criar a Spider. Agradezco a mi segunda familia, los Almeida-Molina, mis partners, mis compañeros de lágrimas y alegrías. Estoy muy orgullosa de ustedes y les deseo lo mejor en esta nueva etapa que se viene en su vida como familia. Estoy segura que seguiremos compartiendo a la distancia y que se vienen nuevos viajes en el horizonte para ir a ver a Nahuel y Freya.

A mi familia shanshil, Matías y Valentina. Gracias por acompañarme en esta etapa de mi vida, han sido un pilar fundamental en mi día a día. Se han amanecido conmigo mientras trabajo y han tenido la paciencia de escucharme hablar interminables horas de mi trabajo. Agradezco a mis amigos, todos ellos. Los que viven en el extranjero y los que están sufriendo en Springfield, que diga, Chile. Muchas gracias por tantos años de amistad y hermosos momentos. ¡Ustedes saben quiénes son!

Agradezco a Laura y a Vicky por su paciencia y buena voluntad, por mostrarme el IATE y recibirme con tanta buena onda en Córdoba. Y finalmente, agradezco a Nilo, mi director, el Gandalf de mi Frodo. Gracias por creer en mí.

Resumen

En este trabajo de tesis se presentan resultados respecto a la búsqueda de fuentes extragalácticas localizadas detrás de la Vía Láctea, basado en datos en el infrarrojo cercano en tres bandas (J, H y K_s) proporcionados por el relevamiento público VISTA Variables en la Vía Láctea (VVV).

Con el fin de estudiar con precisión la dinámica del Grupo Local y comprender el dipolo en el Fondo Cósmico de Microondas, se requiere identificar las fuentes extragalácticas pertenecientes a las Estructuras a Gran Escala (LSS) que dominan el campo de flujo de velocidad. Sin embargo, las LSS no pueden ser trazadas fácilmente debido a la obstrucción que el plano Galáctico impone en longitudes de onda óptica. Para solucionar este problema e identificar la distribución de galaxias en la Zona de Evitamiento, se aplicó el algoritmo descrito en Baravalle et al. (2018) a 12 *tiles* pertenecientes a la región que se ha definido como parte del Puente de Norma; un área de 18 grados cuadrados entre el Supercúmulo de Norma y la Pared del Centaurus. Este algoritmo combina parámetros morfológicos y fotométricos para la detección de fuentes extendidas de naturaleza extragaláctica. Luego de aplicar el procedimiento morfo-fotométrico, se detectaron 8994 candidatos extragalácticos y finalmente, tras inspección visual, 358 detecciones fueron confirmadas como galaxias por primera vez. Posteriormente se analizaron las características fotométricas y estructurales de estas galaxias, tales como magnitudes PSF corregidas por extinción Galáctica, colores, el radio que encierra el 50 % de la luz, el índice de concentración, índice de Sérsic y elipticidad, llegándose a la conclusión que estos objetos son en general pequeños, circulares y rojos, muy posi-

blemente galaxias de tipo temprano, esto último como resultado de la sensibilidad de los relevamientos en infrarrojo cercano de detectar galaxias de este tipo.

Se analizaron concentraciones de galaxias a través de una técnica de clustering que fija tres criterios de selección para los candidatos: la magnitud de la galaxia central ($(K_s)_0 < 14.3$ mag), pertenencia de miembros en un radio de búsqueda y agrupación de miembros en caso de superposición de radios. Al aplicar el procedimiento se obtuvieron siete candidatos (todos concentrados en el *tile* d022) que posteriormente fueron analizados a través del parámetro de color en el diagrama color-magnitud, el cual es indicador de la llamada Secuencia Roja (RS). A pesar de la dificultad de trabajar en zonas de alta extinción, fue posible encontrar un buen candidato por el comportamiento de su RS, y un estudio más detallado debe ser llevado a cabo apoyándose en datos espectroscópicos para análisis dinámico. Este trabajo se presenta como el primero de la colaboración para la búsqueda sistemática de cúmulos en el relevamiento VVV, y da pie a futuros trabajos para trazar la Estructura en Gran Escala del Universo cercano.

Por último, se analizó la dependencia de la extinción con el número de detecciones de candidatos extragalácticos y galaxias confirmadas en los 12 *tiles*. Nuestros resultados muestran que la tasa de detecciones decae drásticamente para regiones de alta extinción debido al efecto del polvo en el disco de la Vía Láctea. Sin embargo en el régimen de baja extinción, no hay una correlación lineal con el número de galaxias detectadas. Un buen ejemplo de esto último es el *tile* d024, donde a pesar de tener baja extinción en la banda K_s , la tasa de detecciones de candidatos extragalácticos también es baja. Esto podría ser un indicativo característico de estructuras a gran escala en el Puente de Norma.

Summary

In this thesis work we present results regarding the search for extragalactic sources located behind the Milky Way, based on near-infrared data in three bands (J, H and K_s), provided by the VISTA Variables in the Vía Láctea (VVV) public survey.

In order to accurately study the dynamics of the Local Group and understand the dipole in the Cosmic Microwave Background radiation, it is required to identify the extragalactic sources that are part of the Large Scale Structures (LSS) that dominate the velocity flow fields. However, the LSS cannot be easily traced because of the obstruction that the Galactic plane imposes in optical wavelengths. To solve this problem and identify the distribution of galaxies in the Zone of Avoidance, we applied the algorithm described in Baravalle et al. (2018) in 12 tiles belonging to the region that has been defined as the Norma Bridge; an area of 18 square degrees between the Norma Supercluster and the Centaurus Wall. The algorithm combines morphological and photometric parameters for the detection of extended sources of extragalactic nature. After applying the morpho-photometric procedure, we detected 8994 extragalactic candidates and finally, after visual inspection, 358 detections were confirmed as galaxies for the first time. We then analyzed the photometric and structural characteristics, such as PSF magnitudes corrected for Galactic extinction, colours, the radius enclosing the 50 % of the light, the concentration index, Sérsic index and ellipticity of these galaxies, reaching the conclusion that these objects are generally small, circular and red, very possibly early-type galaxies, the latter as a result of the sensitivity of near-infrared surveys

to detect galaxies of this type.

We analyzed concentrations of galaxies through clustering technique that sets three selection criteria for candidates: the magnitude of the central galaxy ($(K_s)_o < 14.3$ mag), membership of members in a certain radius, and clustering of members in case of overlapping radius. After we applied the procedure, seven candidates were obtained (all concentrated in the tile d022), which were subsequently analyzed by constructing color-magnitude diagrams in the $(J)_o$ vs $(J-K_s)_o$ space and seeking for members through the color parameter, which is an indicator of the so-called Red Sequence. In spite of the difficulty of working in high extinction regions, it was possible to find a good candidate because of the RS behavior, and a more detailed study should be carried out, relying on spectroscopic data for dynamical analysis. This work is presented as the first of the collaboration for the systematic search of clusters in the VVV survey, and leads to future works to map the Large Scale Structure of the local Universe.

Finally, we analyzed the dependence of extinction on the number of detections of extragalactic candidates and confirmed galaxies by visual inspection in the 12 tiles. Our results show that the rate of detections decrease dramatically for high extinction regions due the effect of dust in the disk of the Milky Way. However, in the low extinction regime, there is no linear correlation with the number of detected galaxies. A good example of the latter is tile d024, where despite having low extinction in the K_s band, the rate of detections for extragalactic candidates is also low. This could be a characteristic indication of large-scale structures in the Norma Bridge.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Estructura a Gran Escala del Universo	1
1.2	Zona de Evitamiento	7
1.3	La Región del Cúmulo de Norma y del Gran Atractor	17
2	Objetivos	22
3	Datos fotométricos	23
3.1	El Telescopio VISTA	23
3.1.1	Datos del relevamiento VVV	27
3.1.2	Fotometría CASU	28
3.1.3	Selección de la región a estudiar	30
4	Procedimiento Fotométrico	32
4.1	SExtractor	34
4.1.1	Estimación del <i>background</i>	34
4.1.2	Detección	35
4.1.3	Separación de objetos o <i>deblending</i>	36
4.1.4	Fotometría	37
4.1.5	Separación de estrellas-galaxias	38
4.2	SExtractor + PSFEx	41
4.2.1	Parámetros fotométricos y estructurales	42
5	Catálogo de Objetos Extragalácticos	45

5.1	Clasificación de objetos	45
5.1.1	Corrección por extinción Galáctica	46
5.1.2	Criterio de Color	47
5.2	Inspección Visual	48
5.3	Resumen	52
6	Resultados	55
6.1	El Puente de Norma	55
6.2	Catálogo de fuentes extragalácticas en el <i>Norma Bridge</i>	57
6.3	Caracterización de fuentes extragalácticas en la región del Puente de Norma .	64
6.3.1	Análisis fotométrico	65
6.3.2	Análisis morfológico	67
6.4	Trazando estructuras	69
6.5	Comparación con relevamientos anteriores	82
7	Discusión y Conclusiones	85

Índice de figuras

1.1	Distribución angular de cuentas de galaxias en el plano de cielo. Figura extraída de Seldner et al. (1977)	2
1.2	Mapa de Anisotropías del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) observado por el satélite Planck	4
1.3	Distribución de galaxias (para determinado <i>redshift</i>) versus ascensión recta: Resultados del primer relevamiento de galaxias original de CfA (Davis et al. 1982)	5
1.4	Distribución espacial de galaxias versus <i>redshift</i> y ascensión recta; extraído del relevamiento <i>2dF Galaxy Redshift Survey</i> (Colless et al. 2001).	6
1.5	Pared del Polo Sur, imagen extraída del trabajo de Pomarède et al. (2020). .	6
1.6	Figura extraída del trabajo de (Kraan-Korteweg & Lahav 2000). Proyección Aitoff de igual área en coordenadas Galácticas para galaxias con $D \geq 1.3$. (Kraan-Korteweg & Lahav 2000).	9
1.7	Distribución de galaxias del cielo en NIR, extraído del trabajo de Jarrett (2004)	13
1.8	Figura extraída de Baravalle et al. (2018). Se muestra el porcentaje de completitud para magnitudes introducidas en la banda K_s para detecciones simuladas de fuentes puntuales y galácticas.	15
1.9	Figura extraída de Baravalle et al. (2021), donde se ve la distribución de galaxias del catálogo VVV NIRGC la región del disco de Galáctico.	17
1.10	Figura extraída de Woudt et al. (2008) donde se puede observar la vista general de LSS en la región de Gran Atractor.	19
3.1	Esquema de la construcción de un <i>Tile</i>	24

ÍNDICE DE FIGURAS

3.2	Esquema de los seis grandes relevamientos públicos conducidos por el telescopio VISTA. Estos cubren diferentes áreas del cielo en diferentes profundidades y un amplio rango de objetivos científicos.	27
3.3	Curvas de transmisión para los cinco filtros de VIRCAM	29
3.4	Esquema de la distribución de <i>tiles</i> para el relevamiento VVV.	29
4.1	Diagrama esquemático del método para <i>deblending</i> (Bertin & Arnouts 1996)	37
4.2	Diagrama de flujo del procedimiento llevado a cabo por SExtractor.	41
5.1	Forma MULTIGETIMAGE de VSA para obtener imágenes visuales desde catálogos con coordenadas ecuatoriales.	48
5.2	Ejemplos de falsas detecciones en el <i>tile</i> d023	49
5.3	Ejemplos de galaxias confirmadas en las 5 bandas de VVV; Z, Y, J, H y K_s , para el <i>tile</i> d023	50
5.4	Imágenes de color compuestas por las bandas J, H y K_s de algunos ejemplos de galaxias confirmadas por inspección visual obtenidas al aplicar el procedimiento descrito en Baravalle et al. (2018) para el <i>tile</i> d023.	51
5.5	Figura extraída de Baravalle et al. (2018). Diagrama de flujo del procedimiento morfo-fotométrico.	54
6.1	Proyecciones del cielo en coordenadas Galácticas para intervalos de <i>redshift</i> centrados en el Gran Atractor. Figura extraída del trabajo de Woudt & Kraan-Korteweg (2000).	56
6.2	Figura extraída de Nagayama et al. (2006). Distribución espacial en coordenadas Galácticas para cúmulos adyacentes a la ZoA.	57
6.3	Distribución normalizada para las galaxias confirmadas en cada uno de los 12 <i>tiles</i> de estudio versus la extinción A_{K_s} , donde cada bin representa un <i>tile</i> . .	60

ÍNDICE DE FIGURAS

6.4	Imagen en infrarrojo lejano del programa AllWISE (1.5×1.5 grados cuadrados) para el <i>tile</i> d024 utilizando la banda W4 de $22 \mu\text{m}$. La imagen está centrada en $(l, b) = (328.9669^\circ, -1.6497^\circ)$, y las tres galaxias confirmadas visualmente en nuestro catálogo para este <i>tile</i> se encuentran etiquetadas por los números 1, 2 y 3 en rojo. La imagen se encuentra proyectada en un plano cartesiano en coordenadas Galácticas.	61
6.5	Imagen en infrarrojo lejano del programa AllWISE (1.5×1.5 grados cuadrados) para el <i>tile</i> d100 utilizando la banda W4 de $22 \mu\text{m}$. La imagen se encuentra centrada en $(l, b) = (328.9913^\circ, 0.05346^\circ)$, y está proyectada en un plano cartesiano en coordenadas Galácticas.	62
6.6	Distribución espacial en coordenadas Galácticas para cúmulos y galaxias adyacentes al Supercúmulo de Norma.	63
6.7	Diagramas color-color y color-magnitud en infrarrojo cercano de todas las galaxias confirmadas en nuestro catálogo vs los candidatos extragalácticos entregados por el algoritmo SExtractor+PSFEx.	65
6.8	Distribuciones de los parámetros fotométricos de las galaxias en los 12 <i>tiles</i> del “Norma Bridge”.	67
6.9	Distribuciones de los parámetros morfológicos de las galaxias en los 12 <i>tiles</i> del “Norma Bridge”.	69
6.10	Distribuciones para la distribución espacial en coordenadas Galácticas en grados. En el panel izquierdo se ve la distribución para la latitud Galáctica, mientras que en el derecho para la longitud Galáctica en grados. Cada bin representa 0.5 grados en el gráfico. Las galaxias confirmadas visualmente sin detección en 2MASS se ven representadas en la línea negra, mientras que aquellas solo con correlación en 2MASS PSC están representadas por la línea azul.	70
6.11	Matriz de correlación de valores del Coeficiente de Pearson.	71
6.12	Número de galaxias confirmadas visualmente con respecto a la extinción en la banda K_s . Cada punto representa el número de detecciones en un <i>tile</i> , y la línea segmentada corresponde a un corte en extinción $A_{K_s} = 3 \text{ mag}$	72

ÍNDICE DE FIGURAS

6.13	Figura extraída de Nilo Castellón et al. (2014). Se muestra en la imagen los Perfiles de Densidad (<i>Galaxy number Density Profiles</i>) para cúmulos de galaxias a bajo <i>redshift</i> para dos muestras: RCS (en rojo) y <i>Blue</i> (en azul). Se muestran los perfiles de densidad numérica radial total de las galaxias en los paneles pequeños.	73
6.14	Distribución espacial en coordenadas Galácticas de los candidatos trazadores de estructura en el <i>tile</i> d022	75
6.15	Distribución espacial en coordenadas Galácticas para los candidatos (3) y (7) con un nuevo radio de búsqueda de 18 minutos de arco. Los puntos fucsias representan el candidato (3), mientras que los triángulos azules el candidato (7). Aquellas galaxias que comparten pertenencia a ambos candidatos se ven representadas con puntos fucsias y triángulos azules sobrepuestos. Los triángulos rojos muestran las galaxias más brillantes que $K_{s_o} < 14.3$ mag, y los círculos celestes representan a las galaxias incluidas a la muestra en un nuevo radio de 18 minutos de arco.	76
6.16	Candidato (1). Los puntos amarillos describen las 5 galaxias concentradas en dos anillos de 5 y 10 minutos de arco de radio, mientras que los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	77
6.17	Candidato (2). Los puntos celestes describen las 9 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en negro las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	77
6.18	Candidato (3). Los puntos fucsias describen las 6 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en negro las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	78

6.19	Candidato (4). Los puntos cafés describen las 5 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en gris las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	78
6.20	Candidato (5). Los puntos verdes describen las 5 galaxias concentradas dos anillos de 5 y 10 minutos de arco de radio, mientras que los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	79
6.21	Candidato (6). Los puntos morados describen las 5 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en gris las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	79
6.22	Candidato (7). Los triángulos azules describen las 5 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en negro las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	80
6.23	Candidato (3) + (7). Los puntos fucsias representan a las galaxias miembro del candidato (3), los puntos azules a las galaxias del candidato (7), mientras que los puntos celestes representan aquellos objetos que se han encontrado al expandir el radio de búsqueda a 18 minutos de arco. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.	80
6.24	Imagen en infrarrojo lejano del programa AllWISE para el <i>tile</i> d022 utilizando la banda W4 de 22 μm . La imagen se encuentra centrada en $(l, b) = (326.0489^\circ, -1.6497^\circ)$, y está proyectada en un plano cartesiano en coordenadas Galácticas.	81
6.25	Distribución espacial en coordenadas Galácticas de galaxias detectadas en este trabajo utilizando el relevamiento VVV.	83
6.26	Fuentes extragalácticas detectadas por <i>The Chandra Source Catalogue</i> en las 5 bandas de VVV; Z, Y, J, H y K_s	84

Índice de tablas

3.1	Segundo Ciclo de Programas en el telescopio VISTA	26
3.2	Características fotométricas de VVV	28
3.3	<i>Tiles</i> a estudiar en la región del Cúmulo de Norma	31
5.1	Resumen de los candidatos extragalácticos y las galaxias confirmadas visualmente en los 12 <i>tiles</i> de la región de Norma	53
6.1	Catálogo de ejemplo para las 10 primeras fuentes extragalácticas en el <i>Norma Bridge</i>	58
6.2	Candidatos a objetos extragalácticos, galaxias confirmadas visualmente y tasa de detección en la región del Puente de Norma	59
6.3	Valores medios para magnitudes, colores y parámetros morfológicos del catálogo general junto al error obtenido a través de la desviación estándar para la media.	68
6.4	Valores para el índice de correlación utilizando el Método estadístico de Pearson para candidatos extragalácticos obtenidos por el algoritmo, galaxias confirmadas visualmente y extinción promedio en el centro de cada tile A_{K_s}	70
6.5	Ejemplos de 10 galaxias confirmadas por inspección visual con <i>crossmatch</i> en 2MASS, AllWISE y CSC	84

Capítulo 1

Introducción

1.1. Estructura a Gran Escala del Universo

Cuando nos detenemos a ver un orden particular en nuestro Planeta, notamos que existen pequeñas estructuras que dan origen a nuevas configuraciones. Nosotros somos un ejemplo de ello: Las células a los tejidos, los tejidos a los órganos y los órganos al Ser Humano. No solamente ocurre en este caso particular, sino que todo aquello que conocemos dentro de nuestra vida terrenal parece formar parte de un **todo**. Así también ocurre cuando miramos el Universo que nos rodea. Sin ir más lejos, nosotros como habitantes del Planeta Tierra orbitamos en torno al Sol; y nuestra estrella gira en torno al centro galáctico a unos 8.5 kpc de distancia. Vivimos en La Vía Láctea (VL), y nuestra Galaxia forma parte de un conjunto de galaxias que se denomina el Grupo Local (GL) donde también pertenecen la galaxia de Andrómeda (M31), La Nube Mayor y La Nube Menor de Magallanes, La galaxia del triángulo (M33), entre más de 50 otras en su mayoría enanas (van den Bergh 2000). Y todo este conjunto de galaxias forma parte del supercúmulo de Virgo, que engloba a más de 100 grupos y cúmulos de galaxias (Einasto et al. 2007).

Cada vez que aumentamos la escala en la que observamos nuestro entorno, nos encontramos con más sistemas organizados y coherentes de materia; lo que parece ser el esqueleto de nuestro Universo. Pero, ¿qué son estas estructuras?

Inicialmente, Edwin Hubble (1926) contribuyó en su catálogo con 400 fuentes que denominó como “Nebulosas extragalácticas”, notando que estos objetos en

el cielo no seguían una distribución homogénea en escalas de 100 Megapársec, sin embargo existía una clara tendencia hacia la homogeneidad a escalas mayores (Hubble 1934). Posteriormente Shane & Wirtanen (1967) utilizando placas fotográficas obtenidas en el observatorio Lick de 0.5m, crearon un catálogo de galaxias otorgando información de más de un millón de estos objetos. En este mismo contexto, Seldner et al. (1977) publicaron un mapa detallado de estas galaxias en celdas angulares del cielo, generando así uno de los primeros mapas con evidencia de la estructura en gran escala del universo: distribuciones de galaxias a través hilos, existencia de vacíos y agrupaciones en cúmulos. (Ver Figura 1.1)

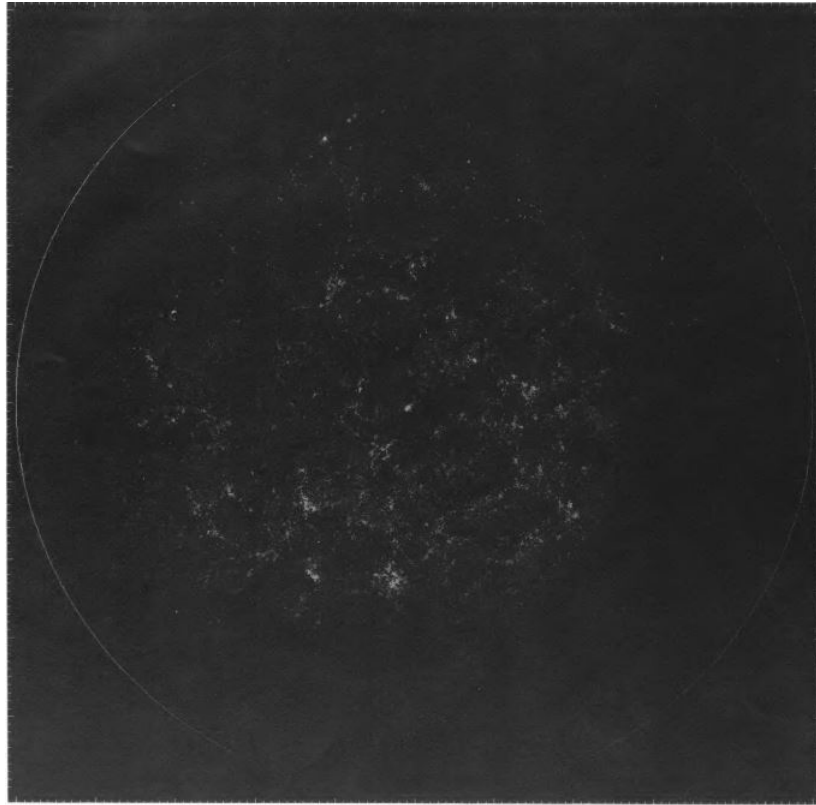


Figura 1.1: Figura extraída de Seldner et al. (1977). Se aprecia en la imagen la distribución angular de cuentas de galaxias más brillante que $B \sim 19$ mag en el plano del cielo, reconstruido del catálogo de galaxias de Lick. Se observa además el número de galaxias observadas en celdas de $10' \times 10'$ a través del hemisferio norte galáctico. El polo norte celeste se encuentra en el centro, mientras que el ecuador galáctico en la orilla y la latitud Galáctica es función lineal del radio. Aquí se puede apreciar una distribución de galaxias no uniforme, donde los grupos de galaxias se representan en blanco, mientras que las zonas oscuras representan una menor densidad de galaxias.

Muchos estudios se han llevado a cabo durante el siglo pasado con el fin de

estudiar la distribución de masa en el Universo (Dirac 1938; Sciama 1953; Dicke 1964). El modelo más aceptado en la actualidad, describe que las estructuras coherentes o *redes cósmicas* fueron formadas por acreción de masa en regiones de alta densidad debido a la gravedad (Peebles 1980; Bond et al. 1996; van de Weygaert & Bond 2008). Sin embargo aún se debate respecto la composición primaria de estas redes cósmicas. ¿Se trata de regiones de masa de alta densidad en un fondo de baja densidad? (Einasto et al. 1980), ¿o enormes vacíos esferoidales rodeados de concentraciones de materia en filamentos? (Ceccarelli et al. 2016; Lares et al. 2017). Cualquiera de estos modelos sea el aceptado, es claro que estas estructuras generan perturbaciones en la expansión del universo e inducen flujos coherentes de grandes volúmenes de materia en direcciones preferentes (Cautun et al. 2014).

Una de las representaciones de estos flujos coherentes se encuentra impresa en la Radiación de Fondo Cósmico de Microondas (Penzias & Wilson 1965, ver Figura 1.2). Se entiende por esta radiación como el remanente de una época primordial en el Universo: la Época de Recombinación, y posee una temperatura promedio de 2.725K (Chluba 2014). Al observarse con radiotelescopios muy sensibles logramos ver una distribución anisotrópica con pequeñas fluctuaciones de temperatura llamadas anisotropías (3.346 ± 0.017 mK; Bennett et al. 2003). Un patrón observable de estas zonas “calientes” y “frías” en el mapa de distribución anisotrópico se conoce como el *Dipolo Anisotrópico de la Radiación de Fondo de Microondas*, y es justamente un efecto dado por la velocidad relativa de la Vía Láctea con respecto al Universo observable, y el movimiento del Grupo Local hacia la posición aparente donde el cúmulo de Virgo está ubicado (Fixsen et al. 1996; Tammann & Sandage 1985; Binggeli et al. 1987; Jerjen & Tammann 1993; Bureau et al. 1996). El valor reportado por Fixsen et al. (1996) para la velocidad relativa peculiar del Sol con respecto al marco comóvil es de 371 ± 1 km s⁻¹.

Pero a escalas aún mayores ¿Como se distribuye la materia? El Principio Cosmológico asegura que a escalas de cientos de Megapársec, el Universo es homogéneo e isotrópico, de modo que si se desea estudiar la dinámica del Universo con mínimos errores, es necesario estudiar grandes volúmenes de espacio, únicamente posibles de realizar a través de relevamientos que cubran gran parte del cielo.

Dentro de los primeros relevamientos de corrimiento al rojo a gran escala y uti-

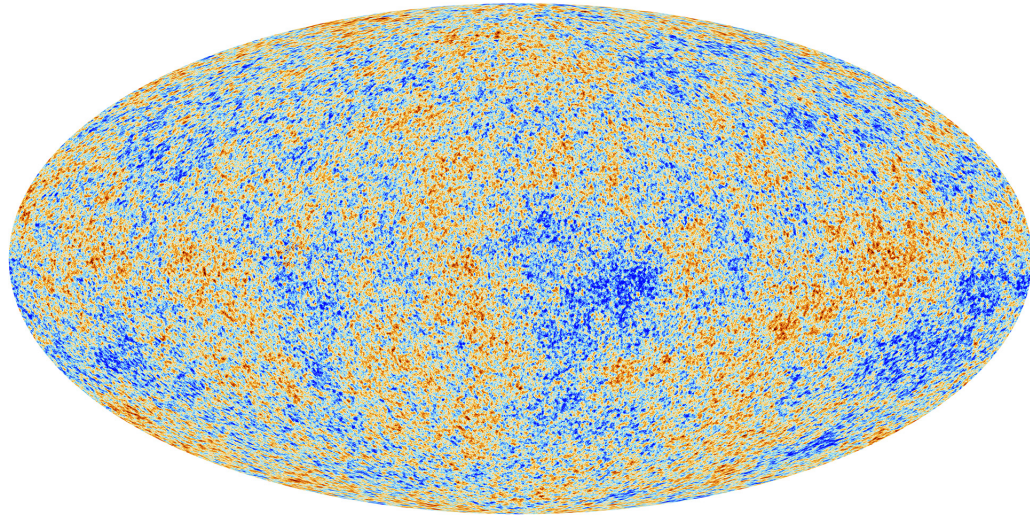


Figura 1.2: Mapa de Anisotropías del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) observado por el satélite Planck. Se pueden apreciar las pequeñas fluctuaciones de temperatura que corresponden a regiones de densidades ligeramente diferentes. Hoy en día se ven los frutos de esas fluctuaciones como estrellas y galaxias.

lizando espectros ópticos tenemos el realizado por Kirschner, Oemler y Schechter (KOS survey; Kirshner et al. 1978) y el Center for Astrophysics (CfA; Davis et al. 1982). El relevamiento KOS midió corrimientos al rojo para 165 galaxias con magnitudes más brillantes que $J = 15$ ($B \approx 15.5$) en ocho diferentes zonas del cielo, cubriendo un total de 15 grados cuadrados, obteniendo el inesperado resultado que las galaxias se encontraban fuertemente agrupadas en el espacio de velocidad. El relevamiento CfA original contuvo corrimientos al rojo para 2400 galaxias más brillantes que magnitud 14.5 a través de los polos norte y sur galácticos, cubriendo un total de 2.7 estereorradianos (Ver Figura 1.3). Posteriormente el segundo relevamiento de CfA (CfA2) obtuvo espectros para un aproximado de 5800 galaxias, revelándose la existencia del supercúmulo “La Gran Pared” (conocida en inglés como *The Great Wall*; Geller & Huchra 1989), el cual se extiende por un ancho de $170h^{-1}$ Megapársec, confirmando que las galaxias no se distribuyen homogéneamente, sino agrupadas en superficies esféricas, las cuales conforman los *vacíos*.

Un importante salto se logró una vez que se desarrollaron los espectrógrafos multi-objeto, técnica que permitió observar numerosas fuentes extragalácticas de forma simultánea. Ejemplo de relevamientos más extensos son el “Two Degree Field Galaxy Redshift Survey” (2dFGRS; Colless et al. 2001, ver Figura 1.4) con un volumen del orden de $4 \times 10^7 h^3 \text{ Mpc}^{-3}$ y corrimientos al rojo espectroscópicos

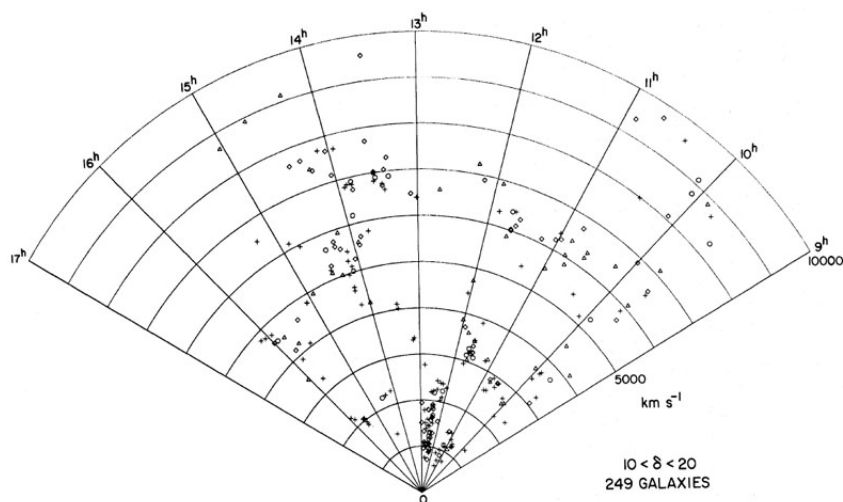


Figura 1.3: Distribución de galaxias en el espacio de corrimiento al rojo para el primer relevamiento de galaxias original de CfA (Davis et al. 1982). En el gráfico se pueden apreciar 249 galaxias como función de la velocidad observada dada para determinado corrimiento al rojo, versus, la ascensión recta para una porción de espacio con declinación entre $10^\circ < \delta < 20^\circ$.

de 200,000 galaxias, y Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York et al. 2000) con volumen del orden de $4 \times 10^7 h^3 \text{ Mpc}^{-3}$ y corrimientos al rojo espectroscópicos de un millón de galaxias. Ambos relevamientos aportan al estudio de la Estructura a Gran Escala del Universo hoy en día, donde es fácil de apreciar que existe una distribución preferencial de galaxias y vacíos.

Continuamente se descubren nuevas estructuras y se conducen estudios diseñados para determinar con precisión la Estructura a Gran Escala del Universo, un ejemplo de ello es el reciente trabajo de Pomarède et al. (2020), donde se detectó una desconocida y dramática estructura filamental llamada “La Pared del Polo Sur” (conocida en inglés como *The South Pole Wall*, ver Figura 1.5), nombrada de esta forma debido a que el sistema yace precisamente en el polo sur galáctico. Este importante descubrimiento une investigaciones pasadas y estudios de estructuras filamentosales tales como Perseus-Pisces (Giovanelli & Haynes 1982; Haynes & Giovanelli 1988), *Southern Wall* (Pellegrini et al. 1990), el flujo Funnel (Pomarède et al. 2017), entre otros.

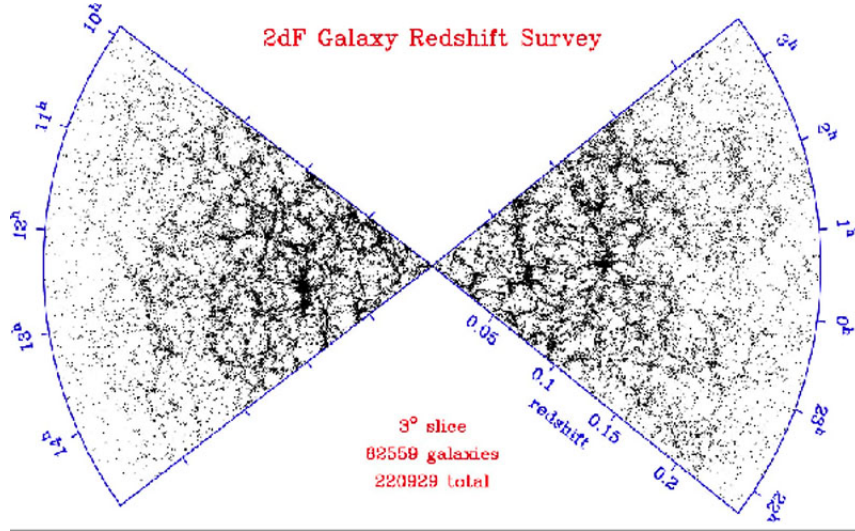


Figura 1.4: Distribución espacial de galaxias del relevamiento *2dF Galaxy Redshift Survey* como función del corrimiento al rojo y la ascensión recta (proyectado a través de 3° en declinación). Figura extraída de Colless et al. (2001).

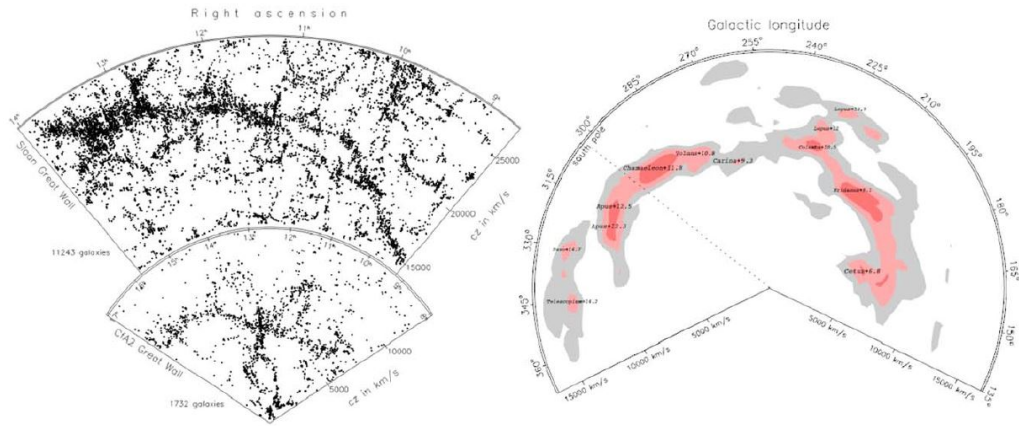


Figura 1.5: Figura extraída de Pomarède et al. (2020). Comparación de la extensión de la Pared del Polo Sur con respecto a dos estructuras cercanas: La Gran Pared de CfA (izquierda abajo) y la Gran Pared de Sloan (izquierda arriba). La Pared del Polo Sur (derecha; Pomarède et al. 2020) está representada por niveles de contorno de isodensidad derivados del campo de velocidad peculiar.

1.2. Zona de Evitamiento

Pocos lugares son más privilegiados que Chile para observar la Vía Láctea, nuestro hogar. Una noche alejada de la ciudad nos permite distinguir la estructura de nuestra galaxia cruzando el cielo junto a la Pequeña y Gran Nube de Magallanes, sus mayores satélites y visibles a simple vista. Sin embargo, nuestra posición dentro de la galaxia nos supone un problema cuando tratamos de estudiar lo que hay atrás de ella... ¿Por qué?

La Vía Láctea es una galaxia espiral que posee una masa de aproximadamente $10^{12} M_{\odot}$ y un diámetro que va desde los 30 a 35 kpc. Tiene estructuras como: bulbo (o del inglés *bulge*), centro galáctico, disco, brazos espirales y halo (Binney et al. 1997). Es justamente el disco y el bulbo aquello que vemos en el cielo, y debido a la proyección que presentan los brazos espirales sobre disco es que se crea una hermosa cortina de estrellas y polvo que se distingue en la oscura tela de fondo.

Son 3 las principales estructuras de la Vía Láctea: El bulbo galáctico, hogar de estrellas de edades mayor a 9 giga años, con metalicidad promedio levemente más baja que la solar ($[Fe/H]=-0.2$) y de estructura más parecida a una *barra* (Binney et al. 1991; Blitz & Spergel 1991); el disco galáctico, separado en dos componentes llamadas disco grueso y disco fino. Las galaxias espirales presentan estas componentes divididas por poblaciones cinemática y químicamente diferentes. Mientras el disco fino contiene polvo, gas y estrellas, el disco más grueso está principalmente poblado de estrellas. Una de las características más distintivas del disco galáctico es la presencia de brazos espirales (Athanassoula 1984); y el Halo; una estructura lejana y esferoidal que engloba todas las componentes anteriores. Aquí todas las estrellas son pobres en metales y muy viejas, como por ejemplo las estrellas *RR Lyrae*.

La Vía Láctea supone un mayor inconveniente cuando se busca mapear la Estructura en Gran Escala. El polvo y las estrellas oscurecen una franja del cielo en longitudes de onda visibles, provocando una enorme vacío en los mapas extragalácticos a baja latitudes Galácticas. Esta zona se denomina: *Zona de Evitamiento*, o del inglés “Zone of Avoidance” (ZoA; Shapley 1961).

La primera referencia a la ZoA nace en 1879 junto al “General Catalogue of Nebulae” (GCN) de Sir John Herschel (1864). Proctor se basó en el GCN para identificar una zona particular que presentaba muy pocas galaxias; “Zone of Few Nebulae”, cercana al Ecuador Galáctico. Posteriormente, esta zona se volvió más notoria una vez que se desarrollaron diversos catálogos con nuevos descubrimientos de galaxias, así como el “New General Catalogue” de Dreyer (1888, 1895). Aquí ya era posible distinguir aglomeraciones de galaxias y estructuras a gran escala como los cúmulos de Virgo, Fornax, Perseus, Piscis y Coma. La *Zona de Pocas Nebulosas* permaneció como un misterio y sin aparente conexión con la naturaleza de la Vía Láctea, puesto que la extinción se mantenía como un tema poco estudiado en aquella época. Años después, nuevos catálogos sumaron información de galaxias distribuidas en gran parte del cielo nocturno tanto en el norte (Uppsala General Catalog, UGC; Nilson 1973), como en el sur (ESO Uppsala Catalog; Lauberts 1982). En conjunto con el *Morphological Catalog of Galaxies* (MGC; Vorontsov-Vel’Yaminov & Arkhipova 1963, 1974), se logró definir un catálogo de galaxias que completaba los esfuerzos anteriores. Sin embargo, para homogeneizar las muestras provenientes de diferentes relevamientos se siguieron restricciones que llevó a un consenso en el diámetro de las galaxias siendo estas mayores a $D = 1.'3$. Este nuevo mapa de estructuras contribuyó al entendimiento de la irregularidad en la distribución de galaxias; la región del Gran Atractor (GA) centrada en $l = 320^\circ$ y $b = 0^\circ$ (Kolatt et al. 1995) y cúmulos adyacentes, así como la existencia de sobredensidades en la dirección del dipolo del CMB.

Los problemas que se hacen notorios ante la interrogante de la ZoA se revelan cuando se compara la Figura 1.6 con los mapas de extinción de $100\mu\text{m}$ del experimento DIRBE (Schlegel et al. 1998): Los catálogos de galaxias en el espectro óptico están limitados cerca del Ecuador Galáctico debido a la presencia de polvo. Además, al tratarse de una zona Galáctica, hay un importante número de estrellas que bloquean parcial o totalmente la luz de los objetos extragalácticos.

La ZoA también se convierte en un obstáculo para estudios cosmológicos. Muchas de las estructuras a gran escala conocidas se encuentran divididas por el Plano Galáctico, tal como el Supercúmulo Local, Perseus-Piscis y el Gran Atractor. Así, muchas preguntas que necesitan un completo mapeo de estos cúmulos y supercúmulos emergen: ¿Cuál es la real extensión, tamaño y masa de estas estruc-

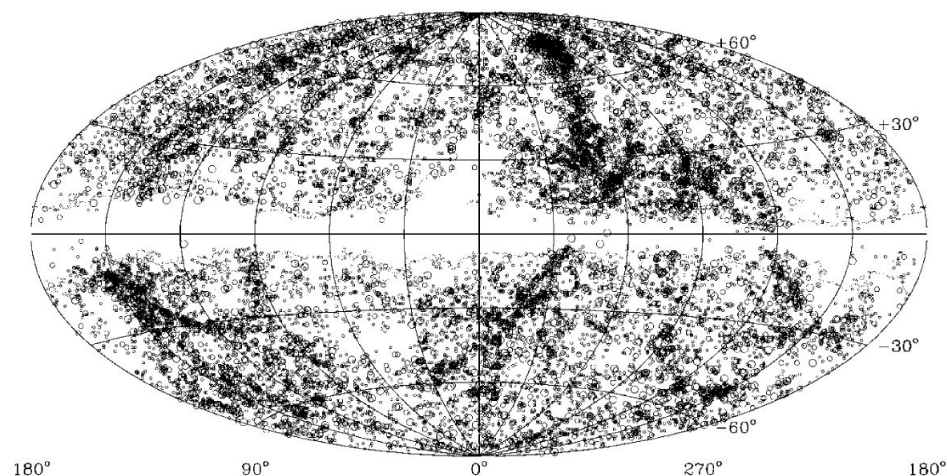


Figura 1.6: Figura extraída del trabajo de (Kraan-Korteweg & Lahav 2000). Proyección Aitoff de igual área en coordenadas Galácticas para galaxias con $D \geq 1'.3$. Las galaxias están codificadas por diámetro: los pequeños círculos representan galaxias con $1'.3 \leq D < 2'$, círculos más grandes $2' \leq D < 3'$, y círculos grandes $D \geq 3'$. El contorno marca la absorción en el azul de $A_B = 1^m.0$, obtenido de los mapas de extinción de Schlegel et al. (1998). Aquí es posible distinguir la distribución incompleta de galaxias debido a la ZoA.

turas?, ¿existe alguna de mayor dominancia para el Grupo Local?, ¿se encuentran conectadas de alguna forma?

Así mismo, esta zona oscurecida representa un dilema para la determinación del Dipolo anisotrópico de la radiación del CMB, que como lo he comentado, puede entenderse como el movimiento peculiar del GL con respecto al CMB. Este movimiento se origina a partir de la atracción gravitacional neta sobre el GL debido a la distribución irregular de materia en el Universo. Ser capaces de entender y determinar estos movimientos desde la distribución de materia puede llevar a importantes restricciones del parámetro cosmológico Ω_0 .

Si bien existen métodos para determinar el dipolo, estos se encuentran asociados a incertezas producidas por la falta de datos en la ZoA. La cobertura de datos sin homogeneidad y suposiciones erróneas de la distribución de galaxias puede acabar introduciendo campos de flujo inexistentes. Es por esto que se vuelve crucial la detección de cúmulos de galaxias, filamentos y *vacíos*, pero también de galaxias cercanas, cuya importancia yace en los calculos de la velocidad peculiar del GL. Bajo la suposición de que tenemos una razón de masa luminosidad constante, se puede determinar la dirección y amplitud de la velocidad peculiar de GL

como una suma de las magnitudes aparentes de las galaxias de interés (Peebles 1994; Kraan-Korteweg 2000). Esto trae una interesante implicación: La mayor parte del movimiento peculiar del Grupo Local se debe a unas pocas galaxias cercanas. Así es como la detección de galaxias cercanas o grupos escondidos a través del polvo de la Vía Láctea se vuelven de crucial importancia, incluso más que la detección de cúmulos lejanos. Estas galaxias cercanas y brillantes son las principales responsables del movimiento peculiar del GL, y por tanto, del dipolo total.

Dentro de los primeros intentos para detectar galaxias en la ZoA se destaca la investigación liderada por Renée Kraan-Korteweg en múltiples instrumentos y diferentes longitudes de onda, siendo una de sus primeras investigaciones el seguimiento de galaxias detectadas en el área de Puppis por Dodd & Brand (1976). Kraan-Korteweg & Huchtmeier (1992) observaron estas galaxias en HI e identificaron un nuevo cúmulo nunca antes estudiado, cuya densidad es comparable al cúmulo de Virgo. El cúmulo de Puppis pasó a ser un interesante objeto de estudio pues su contribución al movimiento del GL podría ser significativo (Lahav et al. 1993). Los seguimientos de velocidades radiales permitieron además entender la dinámica y la masa del Universo cercano. Dentro de estos descubrimientos destacan la conexión del supercúmulo de Perseus-Pisces a través de la ZoA al cúmulo A569, $l = 95^\circ$ y $b = -10^\circ$ (Chamaraux et al. 1990; Pantoja et al. 1997), el descubrimiento de un supercúmulo no muy profundo pero extendido en Vela, $l = 285^\circ$ y $b = 6^\circ$ (Kraan-Korteweg & Woudt 1993), el cúmulo Centaurus-Crux ($l = 306^\circ$, $b = 6^\circ$), y un cúmulo más distante llamado Ara ($l = 329^\circ$, $b = -9^\circ$), ambos descubiertos por Woudt (1998). Kraan-Korteweg & Woudt (1999) discuten la importancia de expandir los estudios en relevamientos de diversas longitudes de onda, incluyendo el espectro visible, infrarrojo y radio. En el primer caso, Kraan-Korteweg (2000) encontró 3279 galaxias en las áreas de los cúmulos de Hydra y Antlia en la dirección de dipolo del CMB ($266^\circ < l < 296^\circ$ y $-10^\circ < b < 8^\circ$), y 8182 galaxias se detectaron tras el estudio de Woudt & Kraan-Korteweg (2001) en las regiones del GA ($289^\circ < l < 338^\circ$ y $|b| < 10^\circ$) y Crux ($289^\circ < l < 318^\circ$ y $|b| < 10^\circ$). Es así como la búsqueda profunda de galaxias en el óptico ha resultado ser beneficiosa para develar un importante número de estructuras antes desconocidas; sin embargo, en las zonas más opacas de la Vía Láctea permanecen escondidas estructuras que podrían ser interesantes de estudiar por su densidad Galáctica y dinámica.

Ya que nuestra Galaxia es completamente transparente a la radiación de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro, varios esfuerzos fueron realizados utilizando relevamientos HI. Dentro de los primeros relevamientos utilizados para la búsqueda sistemática de galaxias en la zona norte del ZoA ($30^\circ \leq l \leq 220^\circ$, $|b| \leq 5^\circ.25$), se encuentra el “Dwingeloo Obscured Galaxies Survey” (DOGS; Henning et al. 1995), un relevamiento conducido en el radiotelescopio Dwingeloo de 25 metros como parte de dos proyectos de búsqueda a ciegas con HI. Dada su baja sensibilidad, un relevamiento de mayor volumen fue realizado para la zona sur ($212^\circ \leq l \leq 36^\circ$; $|b| \leq 5^\circ.5$) de la Vía Láctea: “The Parkes Multibeam ZOA blind HI survey” (Kraan-Korteweg et al. 1998; Staveley-Smith et al. 1998; Henning et al. 1999, 2000). Recientemente, el relevamiento “Arecibo L-band Feed Array Zone of Avoidance” (ALFA ZOA; McIntyre et al. 2015), encontró 61 galaxias en un área de 15° centrada en $l = 192^\circ$ y $b = -2^\circ$, con tan solo 20 % de ellas con previas detecciones en otras longitudes de onda. Por otro lado, Ramatsoku et al. (2016) estudió el supercúmulo de Perseus-Pisces a través de la VL encontrando 211 galaxias donde un 62 % tienen detección en infrarrojo cercano. Staveley-Smith et al. (2016) se acercaron a la región del GA en la zona norte de la Galaxia ($36^\circ \leq l \leq 212^\circ$ y $|b| < 5^\circ$), donde descubrieron nuevas concentraciones de galaxias. Finalmente Kraan-Korteweg et al. (2017) aportó con el descubrimiento de un supercúmulo de galaxias con aproximadamente 4500 nuevas fuentes en la constelación de Vela ($l = 272.5^\circ \pm 20^\circ$, $b = 0^\circ \pm 10^\circ$). Gracias a estos esfuerzos fue demostrada la utilidad de estos relevamientos HI, permitiendo por primera vez mapear la estructura a gran escala sin obstáculos a través de la Vía Láctea.

Si bien es cierto que necesitamos relevamientos a mayores longitudes de onda para estudiar el universo a través del polvo de la VL, podemos aprovechar ciertas bandas en Rayos X para esta tarea. Esto debido a que la VL se vuelve transparente a la emisión de Rayos X duros (por sobre unos pocos keV), y además porque existen cúmulos ricos que emiten con fuerza en estas regiones del espectro electromagnético.

A bajas latitudes Galácticas, nos encontramos con excelentes relevamientos de cielo completo que facilitan la búsqueda de cúmulos de galaxias: Uhuru, Ariel V, HEAO-1 (banda 2-10 keV) y ROSAT (0.1 - 2.4 keV). Como ejemplo de su utilidad, notamos que cuatro de los cúmulos más luminosos (Perseus, Ofiuco, Triangulum

Australis, y PKS 0745-191) en el rango de los 2- 10 keV se encuentran en latitudes Galácticas bajo los 20° (Edge et al. 1990). La colaboración “Clusters in the Zone of Avoidance” (CIZA; Ebeling et al. 1999, 2000b) se ha encargado de la búsqueda sistemática de cúmulos brillantes a bajas latitudes Galácticas utilizando “Rosat Bright Source Catalog” (BSC; Voges et al. 1999), la cual enlista 18811 fuentes brillantes en Rayos X. La robustez del criterio para buscar cúmulos de galaxias en el ZoA en este trabajo ha llevado al descubrimiento de 76 cúmulos donde solo el 20 % se conocían anteriormente (Ebeling et al. 2000a) y subestructuras como la cadena de Perseus-Pisces. Sin duda este acercamiento al estudio de la Estructura a Gran Escala (o conocido en inglés como *Large Scale Structure*; LSS) ha demostrado ser muy útil y de forma complementaria ayuda a cubrir los cúmulos de galaxias que permanecen perdidos a muy bajas latitudes Galácticas.

Cuando trabajamos en infrarrojo cercano (NIR) lo entendemos como un compromiso entre las longitudes del rango óptico y radio. Ya que la extinción decrece como función de la longitud de onda, los fotones del infrarrojo son 10 veces menos afectados por la extinción que en el rango óptico, lo cuál hace posible detectar galaxias que se encuentran a través de la VL en ambientes hostiles y rodeados de polvo. Dentro de esta área cabe destacar trabajos pioneros como el que hace el relevamiento “Two Micron All Sky Survey” (2MASS; Skrutskie et al. 2006), donde mapea un 99.998 % de la esfera celeste en bandas NIR (J, H y K_s) con una magnitud límite de $K_s \sim 13$ mag. Para el bulbo Galáctico se observó las regiones entre las latitudes Galácticas $|b| > 8^\circ$ y para el disco $|b| > 5^\circ$, donde fue posible gracias a las observaciones cerca del ZoA y algoritmos encontrar, caracterizar y extraer galaxias a través del polvo de la VL (Jarrett et al. 2000a). Por otra parte, Jarrett et al. (2000b) realiza un estudio de confiabilidad para las 7000 fuentes detectadas en un área de 1000 grados cuadrados, donde no solamente se observan galaxias, sino también otras fuentes extendidas tales como nebulosas. Para la separación de estrellas y galaxias, Jarrett y colaboradores utilizan la discriminación con planos de color, donde posteriormente se confirman 14 candidatos a galaxias con muestras del 2MASS en el ZoA a través de estudios espectroscópicos en HI y el rango óptico.

En la Figura 1.7 es posible observar una vista panorámica del cielo en NIR extraída del trabajo de Jarrett (2004). Aquí se puede apreciar la distribución de galaxias en el universo cercano acercándose a latitudes galácticas $b \sim 5^\circ$. Para este tra-

bajo se utilizaron datos del catálogo 2MASS *eXtended Source Catalog* (2MASX; Jarrett et al. 2000b), el cual posee más de 1.5 millones de galaxias y un catálogo de fuentes puntuales: *All-Sky Catalog of Point Sources* (2MASS PSC; Cutri et al. 2003), con aproximadamente 500 millones de fuentes estelares pertenecientes a la VL. La importancia de este trabajo radica en el entendimiento de la dinámica local del Universo cercano, lo cuál puede ser estudiado a través de mapas completos de distribución espacial de galaxias. En el caso de la imagen se pueden apreciar estructuras con colores que simplifican la acción del corrimiento al rojo (datos entre paréntesis): En el caso de los tonos azul-violeta encontramos fuentes cercanas con un $z < 0.01$, mientras que para el rojo las fuentes más distantes que 2MASS pudo detectar ($0.04 < z < 0.1$). Estos datos fueron obtenidos de diversos relevamientos espectroscópicos (UGC, CfA, Tully NBGs, LCRS, 2dF, 6dFGS y SDSS), ayudándonos a entender las dimensiones de estructuras masivas pertenecientes al universo cercano; supercúmulos tales como el de Shapley, Leo, Hércules, y la región de GA y Norma ($z \sim 0.016$). Finalmente, la gran imagen que engloba cada una de estas estructuras pertenece al supercúmulo de Laniakea (Tully et al. 2014).

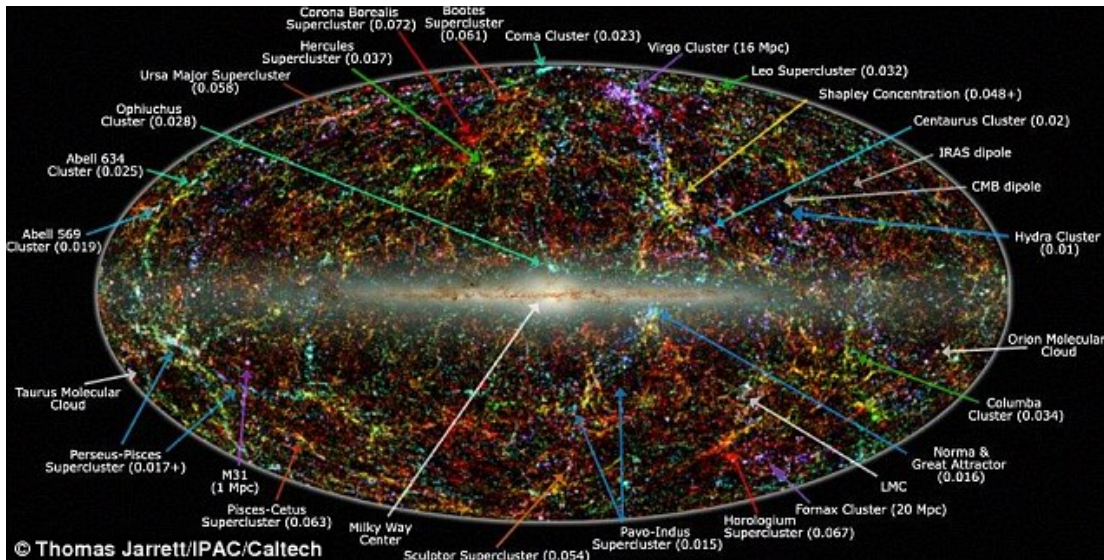


Figura 1.7: Distribución de galaxias del cielo en NIR, extraído del trabajo de Jarrett (2004). Norma y el Gran Atractor se encuentran indicados por la flecha azul de abajo de la derecha.

Los primeros resultados de 2MASS en la búsqueda de objetos extragalácticos resultan ser prometedores y eficientes, lo cuál lleva a nuevos relevamientos a aventurarse en la ZoA. “UKIRT Infrared Deep Sky Survey” (UKIDSS; Lawrence et al.

2007) del telescopio infrarrojo de Reino Unido, y “Kilo-degree INfrared Galaxy Survey” (VIKING; Arnaboldi et al. 2007) del telescopio VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) trabajan en el NIR a mayor profundidad que el relevamiento 2MASS cubriendo diversas zonas del cielo. Los trabajos de Williams et al. (2014) y Said et al. (2016a,b) utilizan estos relevamientos para hacer un seguimiento en infrarrojo cercano de galaxias espirales detectadas en “The Parkes HI Zone of Avoidance Survey” (HIZOA; Henning et al. 2005), obteniendo propiedades fotométricas y morfológicas de 548 y 915 galaxias respectivamente, además de la determinación de distancias y velocidades peculiares. La importancia del uso de relevamientos en NIR radica en su sensibilidad para la detección de galaxias de tipo temprano (*early-type*), debido a que estas son trazadoras de cúmulos y grupos masivos. Además, los datos NIR nos entregan una mejor estimación del contenido de masa estelar de las galaxias lo cual se convierte de extrema utilidad para la aplicación de la relación Tully-Fisher y por ende, la obtención de velocidades peculiares (Tully & Fisher 1977).

El telescopio VISTA ofrece un relevamiento ubicado en la región del disco ($-65^\circ < l < -10^\circ$ y $-2^\circ < b < 2^\circ$) y bulbo galáctico ($-10^\circ < l < 10^\circ$ y $-10^\circ < b < 5^\circ$) llamado VISTA Variables in The Vía Láctea (VVV; Minniti et al. 2010). Se trata de un relevamiento multi-época que si bien fue concebido para el estudio de objetos variables en las regiones centrales de nuestra Galaxia, presenta una excelente ayuda para el estudio y detección de fuentes extragalácticas. Dentro de los estudios más importantes realizados destacamos el trabajo pionero de Amôres et al. (2012). En su investigación identificaron 473 fuentes extendidas en el *tile* d003 ($l = 298.356^\circ$, $b = -1.650^\circ$) a través de inspección visual en la imagen a color compuesta por las bandas J, H y K_s . Para la separación de fuentes extragalácticas de otras fuentes extendidas que podrían ser engañosas para la muestra (estrellas dobles, apiñamiento de estrellas) Amôres et al. (2012) utilizaron diagramas color-color tales como (J- K_s) y (H- K_s), lo que les permitió discriminar galaxias de falsas detecciones, obteniendo finalmente 300 candidatos a galaxias en el área de estudio.

En Baravalle et al. (2018) se acercaron a la detección de galaxias a través del polvo galáctico usando un procedimiento morfo-fotométrico con una combinación de SExtractor v2.19.1 (Bertin & Arnouts 1996) + PSFEx v3.17 (PSF Extractor;

Bertin 2011) como una aproximación automática hacia el proceso llevado a cabo por Amôres y sus colaboradores. Los resultados reportados en Baravalle et al. (2018), muestran una mejoría sustancial tanto en el número de detecciones como la calidad de fotometría. El número de objetos detectados incrementa en un 30 % para magnitudes más brillantes y un 50 % para magnitudes más débiles comparadas con los catálogos generados por CASU (*Cambridge Astronomy Survey Unit*). En la Figura 1.8 extraída de Baravalle et al. (2018), se muestra la completitud para la banda K_s en dos de los *tiles* estudiados por los autores. Como resultado y tras aplicar este procedimiento en los *tiles* d010 y d115, se obtuvieron parámetros fotométricos para el total de 345 y 185 fuentes extragalácticas respectivamente. Todas las fuentes, tras inspección visual, fueron confirmadas como candidatos a galaxias.

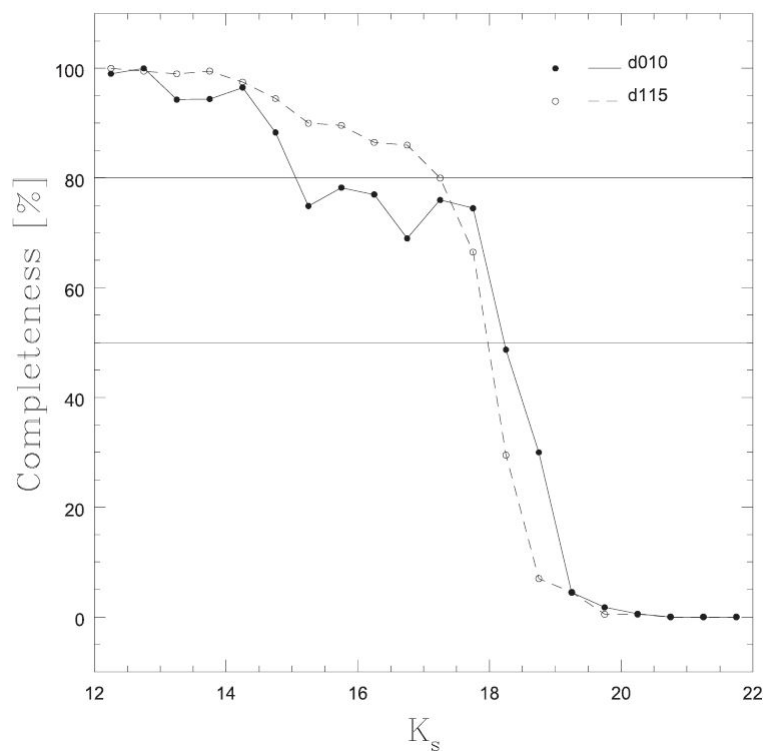


Figura 1.8: Figura extraída de Baravalle et al. (2018). Se muestra el porcentaje de completitud para magnitudes introducidas en la banda K_s para detecciones simuladas de fuentes puntuales y galácticas. Los puntos negros y la línea sólida corresponden al *tile* d010, mientras que los puntos vacíos y línea discontinua corresponden al *tile* d115. Además se muestran los niveles de completitud del 80 % y 50 %.

Posteriormente en Baravalle et al. (2019) reportamos el primer cúmulo detectado VVV-J144321-611754 ($l = 315.836^\circ$, $b = -1.650^\circ$) utilizando el relevamiento VVV. Fue localizado en el *tile* d015, zona con un valor de extinción media en K_s de $A_{K_s} = 0.73 \pm 0.01$ mag. Para la región estudiada de 30×30 minutos de arco cuadrados se calcularon las magnitudes PSF obteniéndose para una muestra de 25 galaxias los rangos entre 13.70 y 16.00 en la banda K_s . Luego se realizó un seguimiento espectroscópico utilizando el telescopio infrarrojo GEMINI South y el instrumento FLAMINGOS-2 en el modo *Fast Turnaround*. Tras un apropiado análisis para entender la naturaleza del cúmulo pudieron encontrarse los corrimientos al rojo de dos de las galaxias más brillantes de la muestra (VVV-J144321.06-611753.9 con $z = 0.234 \pm 0.022$, y VVV-J144319.02-611746.1 con $z = 0.232 \pm 0.019$), donde finalmente los parámetros morfológicos confirmaron la naturaleza de estas galaxias como de tipo temprano pertenecientes a un cúmulo galáctico de características comunes.

Más recientemente en Baravalle et al. (2021) se presentó un catálogo que engloba la detección de un total de 5563 galaxias confirmadas visualmente en todo el disco del relevamiento VVV, yendo de 2 a 4 magnitudes más profundo que 2MASS. Utilizando el mismo procedimiento descrito en Baravalle et al. (2018) pudieron calcularse propiedades fotométricas y morfológicas para esta muestra, donde 99% de las galaxias detectadas no tenían identificación previa. Este trabajo reúne hasta la fecha el compilado más grande de galaxias a través de la VL a bajas latitudes Galácticas (Ver Figura 1.9).

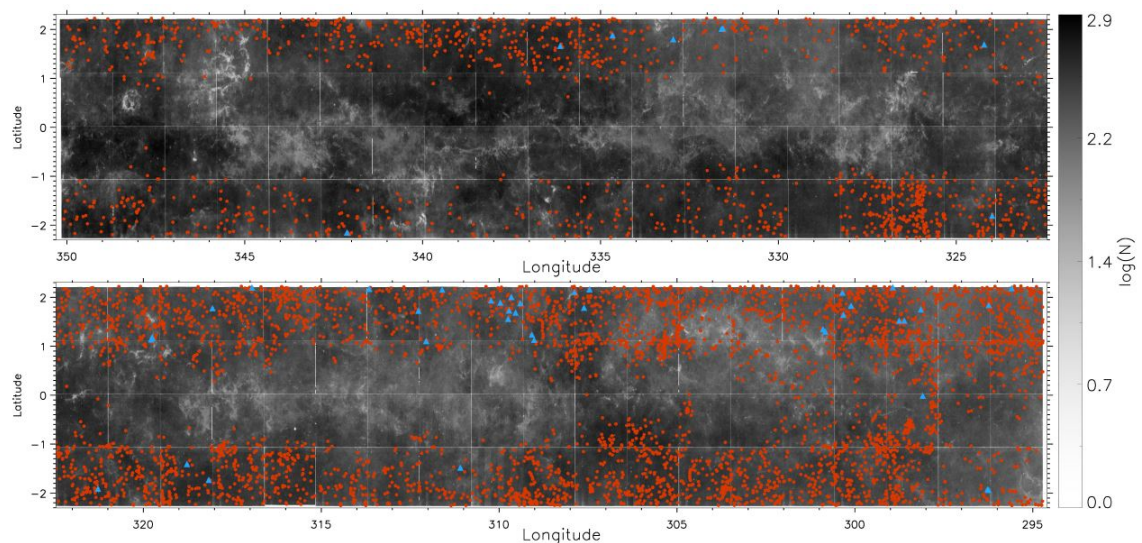


Figura 1.9: Figura extraída de Baravalle et al. (2021), donde se ve la distribución de galaxias en la región del disco de VVV. Superpuesto está el mapa de densidad estelar en escala de grises, proporcionado por los catálogos de Alonso-García et al. (2018). Las galaxias del catálogo VVV NIRGC se encuentran representadas por círculos rojos mientras que aquellas con detecciones en otros relevamientos se encuentran en triángulos azules.

1.3. La Región del Cúmulo de Norma y del Gran Atractor

Una de las sobredensidades más interesantes de estudiar en el Universo cercano es la del Gran Atractor (GA), esto debido a que la dinámica de galaxias en nuestro vecindario se encuentra fuertemente dominada por esta estructura (Dressler et al. 1987; Lynden-Bell et al. 1988; Tonry et al. 2000a). Esta región en el cielo contribuye de forma importante al movimiento peculiar del Grupo Local (GP), y por ende es vital encontrar las fuentes extragalácticas pertenecientes a dicha región para completar el mapa de la Estructura a Gran Escala (Woudt et al. 2008). El Gran Atractor, inicialmente identificada a partir de las velocidades peculiares de las galaxias que fluyen hacia esta sobredensidad, no presenta una clara concentración de galaxias como es el caso del supercúmulo de Shapley (Scaramella et al. 1989; Einasto et al. 1997; Proust et al. 2006). Cuando se piensa en la ubicación del GA esto no es sorpresa, debido a que el centro aproximado de la sobredensidad se encuentra en $(l, b, v) \sim (320^\circ, 0^\circ, 4000 \text{ km s}^{-1})$ según Kolatt et al. (1995). Es decir, dada la baja latitud Galáctica podemos localizarla directamente en el ZoA. Luego, la luz emitida por las fuentes extragalácticas pertenecientes a esta concentración

se encuentra disminuida debido al polvo de la VL. Su confirmación fue posible gracias a la reconstrucción de los campos de masa y densidad suavizados sobre 1200 km s^{-1} (Dekel 1994; Kolatt et al. 1995; Erdoğan et al. 2006), sin embargo esto llevó a una importante incerteza en su posición de aproximadamente 17° . Debido a la falta de datos de fuentes extragalácticas en la región del GA se vuelve imposible estudiar con precisión la naturaleza y extensión de dicha sobredensidad a través de la ZoA.

Por otro lado, el Cúmulo de Norma (ACO 3627; Abell, Corwin, & Olowin 1989) localizado en $(l, b, v) \sim (325^\circ, -7^\circ, 4844 \text{ km s}^{-1})$, ha sido identificado como el cúmulo más masivo en la región del GA (Kraan-Korteweg et al. 1996; Woudt 1998), con propiedades comparables al cúmulo de Coma (Mazure et al. 1998). Anteriormente Abell et al. (1989) clasificó este cúmulo como un cúmulo irregular (I) con tipo I Bautz-Morgan (Bautz & Morgan 1970). Y fue gracias a las observaciones en Rayos-X con ROSAT (Boehringer et al. 1996) y ASCA (Tamura et al. 1998) que se confirmó la naturaleza masiva de este cúmulo. La importancia de Norma radica en su posición como el centro de una red de filamentos conectados de tipo pared tal como se aprecia en la Figura 1.10 (Woudt 1998; Kraan-Korteweg & Lahav 2000; Radburn-Smith et al. 2006), muy similar a lo presentado en la simulación Millenium (Springel et al. 2005) donde se pueden apreciar estructuras análogas rodeando concentraciones de masa bajo el modelo Λ CDM (conocido en inglés como *Cold Dark Matter*).

Varios estudios multi-longitud de onda han sido llevados a cabo en la región del Cúmulo de Norma para el descubrimiento de nuevos cúmulos asociados. Entre ellos se destaca la búsqueda en Rayos-X para cúmulos altamente oscurecidos en la ZoA (Ebeling, Mullis, & Tully 2002) donde se descubrió la existencia del segundo cúmulo más masivo en el área de Norma: CIZA J1324.7-5736 localizado en $(l, b, v) \sim (307.4^\circ, +5.0^\circ, 5700 \text{ km s}^{-1})$, siendo este aproximadamente un 50% a 70% menos masivo que el cúmulo de Norma (Radburn-Smith et al. 2006). Luego y a través de un relevamiento de observaciones profundas en infrarrojo cercano, Nagayama et al. (2004) descubren un nuevo cúmulo, esta vez de baja masa ubicado cerca de la galaxia de radio elíptica PKS 1343-601 en $(l, b, v) \sim (309.7^\circ, +1.7^\circ, 3900 \text{ km s}^{-1})$. Además del significativo descubrimientos de estos cúmulos, a través del relevamiento HIZOA también es posible distinguir una clara sobredensidad a

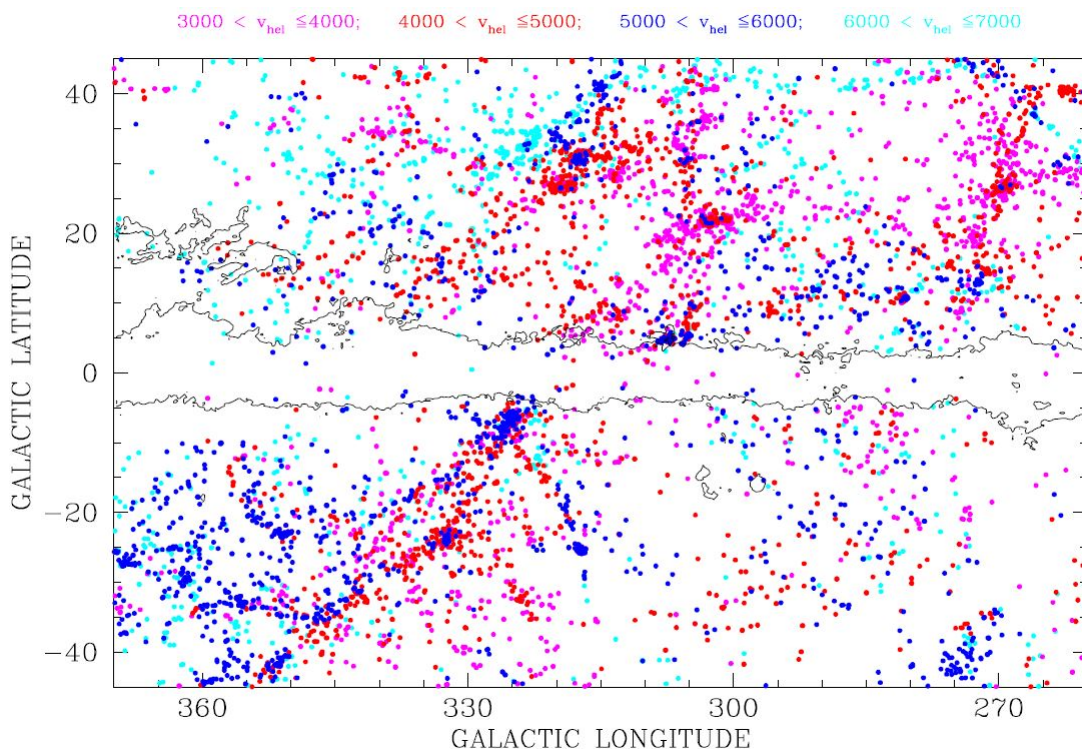


Figura 1.10: Figura extraída de Woudt et al. (2008) donde se puede observar la vista general de LSS en la región de Gran Atractor entre $3000 < v_{hel} < 7000 \text{ km s}^{-1}$. El cúmulo de Norma está localizado en $(l, b, v) = (325.3^\circ, -7.2^\circ, 4871 \text{ km s}^{-1})$. Otros cúmulos importantes que pueden encontrarse son el cúmulo de Pavo II a $(l, b, v) = (332^\circ, -23.6^\circ, 4167 \text{ km s}^{-1})$, el cúmulo del Centauro en $(l, b, v) = (302.4^\circ, +21.6^\circ, 3418 \text{ km s}^{-1})$, el cúmulo de Hydra en $(l, b, v) = (269.6^\circ, +26.5^\circ, 4167 \text{ km s}^{-1})$, y los cúmulos de CIZA J1324.7-5736 y Cen-Crux en $(l, b, v) = (307.4^\circ, +5.0^\circ, 5700 \text{ km s}^{-1})$ y $(305^\circ, +5^\circ, 6214 \text{ km s}^{-1})$, respectivamente. El contorno sólido marca la línea de igual extinción Galáctica en primer plano ($A_B = 3^m.0$, de Schlegel, Finkbeiner, & Davis (1998)).

lo largo del cúmulo de Norma.

Woudt et al. (2008) analiza la dinámica del Cúmulo de Norma utilizando el espectrógrafo 2dF del Observatorio Anglo-Australiano, donde obtienen 129 nuevos corrimientos al rojo para galaxias. Dentro de su trabajo se observa una distribución de galaxias que muestra clara elongación, donde los miembros (población de galaxias tipo temprano) se encuentran alineados con la principal estructura del GA. A pesar de la apariencia relajada del cúmulo se demuestra, sin embargo, una gran cantidad de miembros agrupados en estructuras más pequeñas en adición a la región central identificada con Rayos-X. En un seguimiento del trabajo de Woudt et al. (2008), Skelton, Woudt, & Kraan-Korteweg (2009) estudian la

Función de Luminosidad (LF) en el cúmulo de Norma utilizando la banda K_s de infrarrojo cercano. Esto provee una interesante herramienta comparativa para examinar cambios en la composición del cúmulo y además explorar la evolución de galaxias en ambientes densos. Concluyen que la LF construida utilizando su catálogo tiene una forma similar a las LF infrarrojas vistas en otros cúmulos del campo, donde la función de Schechter (1976) tiene una magnitud característica de $M_{K_s}^* = -25.39 \pm 0.80$ mag y una pendiente final débil de $\alpha = 1.26 \pm 0.10$. Por último, Mutabazi et al. (2014) utilizan el Plano Fundamental con la banda K_s para medir la distancia del cúmulo de Norma con respecto al cúmulo de Coma. Asumiendo que este último se encuentra en reposo con respecto al marco del CMB se deriva la distancia al cúmulo de Norma como $d = 5026 \pm 160$ km s⁻¹; mientras que la velocidad peculiar es de -72 ± 170 km s⁻¹. Esto, respecto a reportes previos de velocidades peculiares de otros cúmulos y galaxias en la región del GA, indica que el cúmulo de Norma es de hecho, un buen representante del núcleo de la estructura del GA.

Finalmente, para estudiar la dinámica de la Estructura a Gran Escala del Universo cercano entendemos como imperiosa la necesidad de completar el mapa de estructuras ocultas a través de la VL en la dirección del Gran Atractor. Utilizando datos fotométricos del relevamiento VVV generaremos un catálogo de fuentes extragalácticas en la dirección oculta del corazón del Gran Atractor, el cúmulo de Norma, de forma que podremos determinar la distribución de galaxias en el infrarrojo cercano con mayor profundidad que otros relevamientos llevados a cabo en la zona y con una resolución sin precedentes.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: En el Capítulo 2 se detallan los objetivos establecidos para llevar a cabo este trabajo. En el Capítulo 3 se describe el telescopio VISTA y su instrumento VIRCAM, los respectivos relevamientos que lo componen y los datos fotométricos utilizados en esta tesis. En el Capítulo 4 se presenta el procedimiento fotométrico como combinación de **SExtractor v2.19.1 + PSFEx v3.17** para la obtención de catálogos propios, comparación de resultados obtenidos con otros relevamientos en el área, inspección visual para la confirmación de los candidatos a galaxias y un esquema a modo de resumen para la imagen global del procedimiento fotométrico. En el Capítulo 5 se detallan las características de las galaxias confirmadas. En el Capítulo 6 se detallan las propiedades morfológicas y fotométricas de los objetos extragalácticos, y la búsqueda de estructuras en el puente de Norma. Finalmente, se da espacio a una pequeña discusión y conclusiones de los principales resultados del trabajo, así como también desarrollo a futuro de la colaboración y posterior trabajo de análisis en el relevamiento VVVx.

A través de este trabajo se utilizaron los siguientes parámetros cosmológicos: $H_0 = 70.4 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.272$, y $\Omega_\lambda = 0.728$ (Komatsu et al. 2011).

Capítulo 2

Objetivos

En este trabajo se utilizaron imágenes en el infrarrojo cercano provistas por el relevamiento VVV para la búsqueda y detección de posibles candidatos extragalácticos en el disco de nuestra Galaxia. En particular, se tomó la proyección del Cúmulo de Norma con 12 *tiles* adyacentes y un área de 18 grados cuadrados, esto con el fin de estudiar la posible asociación de nuevas galaxias encontradas en nuestros catálogos con respecto a estudios realizados en la misma región de la ZoA. Para ello se aplicó un algoritmo compuesto de herramientas morfológicas y fotométricas para seleccionar y clasificar todas las fuentes de la imagen. Además, los candidatos obtenidos fueron analizados visualmente para eliminar las falsas detecciones, obteniéndose así un catálogo general de galaxias confirmadas. Luego, para realizar este estudio se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Aplicar un algoritmo de selección para detectar y buscar sistemáticamente fuentes de naturaleza extragaláctica en la dirección del Cúmulo de Norma, a través del disco de la Vía Láctea.
- Generar un catálogo de candidatos extragalácticos caracterizados por parámetros fotométricos y morfológicos.
- Analizar los miembros del catálogo para eliminar falsas detecciones, utilizando para ello criterios de color e inspección visual. Esto con el fin de obtener un catálogo final con una muestra de galaxias confirmadas.
- Caracterizar y definir las propiedades fotométricas de dichas fuentes en el infrarrojo cercano para determinar la existencia de posibles asociaciones de galaxias en la ZoA.

Capítulo 3

Datos fotométricos

3.1. El Telescopio VISTA

VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy; Emerson & Sutherland 2010) es un telescopio de 4.1 metros de apertura principal, perteneciente al Observatorio Europeo Austral (ESO) y localizado en Observatorio del Cerro Paranal en la región de Antofagasta. Comenzó sus operaciones científicas en diciembre de 2009, y fue diseñado para llevar a cabo relevamientos de gran escala en el cielo del hemisferio sur. Dentro de las características técnicas del telescopio se destaca su montura altazimutal y una óptica quasi Ritchey-Chrétien. El espejo primario es un hiperboloide cóncavo con razón focal $f/1$. Posee forma de menisco con 17 centímetros de espesor y un agujero central de 1.2 metros donde se acomoda la cámara principal en el foco Cassegrain. El espejo secundario es un hiperboloide convexo de 1.24 metros de diámetro. La combinación de ambos espejos resulta en una longitud focal de 12.1 m y foco secundario de $f/3.26$ (McPherson et al. 2006). El principal instrumento instalado en VISTA es la cámara de campo amplio VIRCAM (the Vista InfraRed CAMera; Dalton et al. 2006), que posee una resolución angular de 0.34 segundos de arco y un importante campo de visión que ofrece desde 1.1 a 1.5 grados de diámetro. VIRCAM cuenta con 5 filtros de banda ancha en Z, Y, J, H, K_s y un filtro de banda estrecha a $1.18\text{ }\mu\text{m}$. Además, contiene un arreglo 16 detectores 2048×2048 , totalizando 67 megapíxeles que otorgan 0.6 grados cuadrados de área de píxeles activa (Sutherland et al. 2015). Debido a que estos detectores se encuentran espaciados, seis exposiciones (conocidos como “pawprints”) son requeridos para completar un área uniforme que es conocida como *Tile* (Ver Figura 3.1). VISTA es un telescopio que trabaja en longitudes de

onda infrarrojas (0.9 a 2.5 μm), y conduce variados relevamientos que han sido propuestos y seleccionados bajo un determinado objetivo científico. En la Figura 3.2 se muestra la cobertura espacial de estos seis diferentes relevamientos, cuyas principales características son:

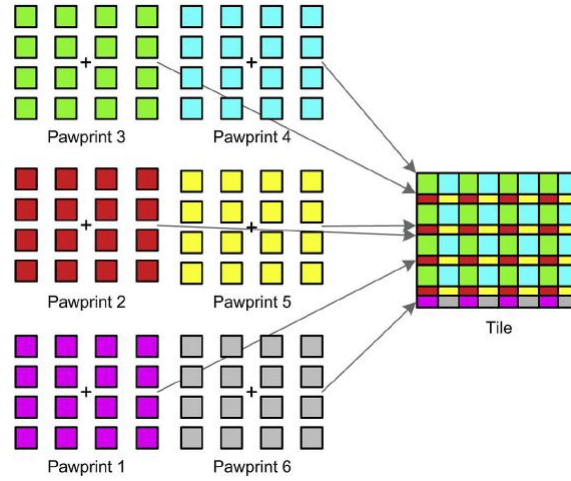


Figura 3.1: Construcción de un *Tile* a partir del movimiento del telescopio en 6 diferentes exposiciones (*Pawprint*).

VHS (VISTA Hemisphere Survey; McMahon et al. 2013): El relevamiento de mayor extensión, cubriendo casi todo el hemisferio sur celeste ($\sim 20,000$ grados cuadrados) en al menos dos bandas, J y K_s . El tiempo de exposición de 60 segundos por banda permite magnitudes límites para fuentes puntuales de $J = 20.2$ mag y $K_s = 18.1$ mag. En los objetivos científicos de VHS encontramos la medición de la Estructura a Gran Escala del Universo hasta un corrimiento al rojo de $z \sim 1$ y medición de propiedades de la energía oscura; el estudio y descubrimiento de estrellas cercanas de baja masa; descubrimiento de quásares con $z > 7$ para estudios de bariones en el medio intergaláctico durante la Época de la Reionización; descifrar la historia de formación de la Galaxia a través de la estructura estelar Galáctica, entre otros (McMahon et al. 2013).

VVV (VISTA Variables in the Vía Láctea; Minniti et al. 2010): El primer relevamiento del telescopio VISTA dedicado al estudio de las zonas centrales de nuestra Galaxia, cubriendo un total de 520 grados cuadrados en el bulge y el disco interno con observación multi-época en la banda K_s . Uno de los objetivos princi-

pales de este relevamiento es el estudio y detección de eventos variables tales como eventos de “*microlensing*”, tránsito de planetas, y estrellas variables periódicas; las *RR Lyrae*. Estas últimas son importantes trazadores de población vieja que permiten mapear la estructura 3D de la Galaxia (Carney et al. 1995) con el fin de entregar información clave sobre la edad de su población. El catálogo final de VVV provee alrededor de mil millones de fuentes puntuales, donde un millón de ellos son objetos variables. Además, se espera que sea capaz de detectar más de cien regiones de formación estelar y cúmulos estelares que aún no han entrado en la Secuencia Principal.

VMC (VISTA Magellanic Cloud Survey; Cioni et al. 2011): El relevamiento VMC cubre ambas Nubes de Magallanes y parte del puente que los une en un área de 184 grados cuadrados en las bandas infrarrojas Y, J y K_s . Las multi-épocas en la banda K_s generan estudios y detección de estrellas variables, la caracterización de magnitudes de estrellas pulsantes variables tales como las *RR Lyrae* y las *Cefeidas*, y la detección de estrellas tan débiles como aquellas estrellas viejas que pertenecen al punto de *turn-off* de la Secuencia Principal. Además, ya que las Nubes de Magallanes proveen un excelente laboratorio de cosmología en nuestro vecindario, los estudios llevados a cabo con los datos de VMC permitirán entender el impacto de la interacción de galaxias; cómo se ve afectada su Historia de Formación Estelar en un ambiente dinámico de interacción; el origen del *Puente Magallánico*, y si la geometría de sistema depende de su edad o metalicidad.

VIKING (VISTA Kilo-degree Infrared Galaxy Survey; Edge et al. 2013): Con una cobertura de 1500 grados cuadrados en dos áreas de cielo, VIKING se revela como un relevamiento extragaláctico de profundidad media ($0.7 < z < 2$) que permite estudios tales como la detección de cuásares y estrellas de baja masa, y análisis de grupos y cúmulos de galaxias. VIKING es capaz de generar fotometrías en infrarrojo cercano más profundas que VISTA VHS, de modo que al trabajar en conjunto con otros relevamientos multi-longitud de onda, se pueden llevar a cabo descubrimientos fortuitos de fuentes peculiares o extremas; remarcando entonces la importancia del trabajo en equipo junto a otros relevamientos.

VIDEO (VISTA Deep Extragalactic Observations; Jarvis et al. 2013): Este relevamiento profundo con cobertura aproximada 12 grados cuadrados fue diseñado

para responder preguntas claves como la formación y evolución de galaxias. Fue conducido en tres campos bien estudiados del área extragaláctica (*Chandra* Deep Field south; XMM-LSS; y ELAIS-S1) en las cinco bandas infrarrojas Z, Y, J, H y K_s y con magnitudes límites de $Z = 25.7$ mag, $Y = 24.5$ mag, $J = 24.4$ mag, $H = 24.1$ mag y $K_s = 23.8$ mag. Dentro de los objetivos científicos se encuentra el estudio de poblaciones galácticas en corrimientos al rojo entre 1 y 2.5, galaxias con núcleos activos (AGN), cúmulos muy masivos y grupos de galaxias, y gracias a su profundidad, el análisis de galaxias y estructuras mayores hasta $z = 4$.

ULTRAVISTA (Ultradeep VISTA survey; McCracken et al. 2012): ULTRAVISTA es el relevamiento de menor cobertura y más profundo del telescopio VISTA, concentrando sus observaciones en el área de un *tile* que corresponde al campo de *The Cosmic Evolution Survey* (COSMOS; Scoville et al. 2007), del telescopio espacial Hubble. Esta pequeña región de aproximadamente un grado cuadrado es una de las más estudiadas para la evolución y formación de galaxias y posee variadas observaciones en distintas longitudes de ondas, con magnitudes límites de $Y = 25$ mag, y alrededor de 24 mag para las bandas más rojas, J, H y K_s . Dentro de sus objetivos científicos se encuentra la detección de galaxias “*Lyman break*” muy luminosas a un $z \sim 7$, estudios y mediciones de galaxias distantes ($z > 6$) y débiles ($K_s = 24$ mag), y el estudio de galaxias con formación estelar que son oscurecidas por el polvo.

Actualmente el telescopio VISTA se encuentra en el segundo ciclo de relevamientos con 7 nuevos programas, según consta en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1: Segundo Ciclo de Programas en el telescopio VISTA

Acrónimo	Título Corto	PI	Área(grad ²)	Filtros	Número total de horas
VINROUGE	<i>Kilonova counterparts to Gravitational wave sources</i>	N. Tanvir	0 (100)	Y, J, K_s	420
Cont. UltraVISTA	<i>Completing the legacy of UltraVISTA</i>	J. Dunlop	0.75	J, H, K_s	756
VVVX	<i>Extending VVV to higher Galactic latitudes</i>	D. Minniti	1700	J, H, K_s	1900
VEILS	<i>VISTA Extragalactic Infrared Survey</i>	M. Banerji	9	J, K_s	1180
GCAV	<i>Galaxy Clusters at VIRCAM</i>	M. Nonino	30	Y, J, K_s	560
VISIONS	<i>VISTA star formation atlas</i>	J. Alves	550	J, H, K_s	553
SHARKS	<i>Southern Herschel-Atlas Regions K-band survey</i>	I. Oteo	300	K_s	1200

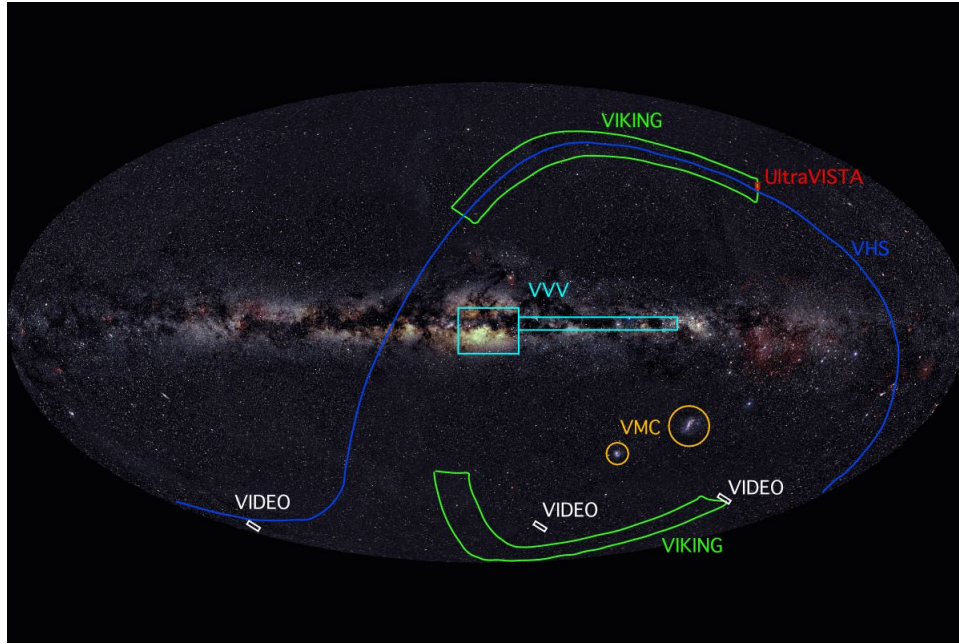


Figura 3.2: Esquema de los seis grandes relevamientos públicos conducidos por el telescopio VISTA. Estos cubren diferentes áreas del cielo en diferentes profundidades y un amplio rango de objetivos científicos.

3.1.1. Datos del relevamiento VVV

Aunque la finalidad principal del relevamiento VVV es la de estudiar la población estelar en las regiones centrales de nuestra Galaxia, gracias a la calidad de los datos obtenidos por VISTA+VIRCAM, se ha descubierto una importante utilidad cuando se trata del estudio de fuentes extragalácticas y la Estructura en Gran Escala (Amôres et al. 2012; Coldwell et al. 2014; Baravalle et al. 2018, 2019, 2021).

En la Figura 3.4 puede apreciarse la distribución de *tiles* para el relevamiento VVV en coordenadas galácticas; mientras que en el rectángulo azul puede apreciarse el área seleccionada para el estudio. Ya que cada *tile* cuenta con un área uniforme del cielo de 1.5 grados cuadrados ($1^\circ \times 1.5^\circ$), VVV cubre un área de 520° cuadrados en el cielo con un total de 348 *tiles*; 196 *tiles* en el bulge (identificación *b*) y 152 que cubren el disco de nuestra Galaxia (identificación *d*).

En el caso de los *tiles* que cubren el *bulge* se tiene una cobertura de 300 grados cuadrados que van desde $-10^\circ \leq l \leq 10^\circ$ en longitud Galáctica y $-10^\circ \leq b \leq 5^\circ$ en latitud Galáctica. Mientras que en el disco abarca 220° cuadrados y va desde

$295^\circ \leq l \leq 350^\circ$ en longitud Galáctica y $-2^\circ \leq b \leq 2^\circ$ en latitud Galáctica.

En la Tabla 3.2 se pueden ver los distintos valores fotométricos característicos para el relevamiento VVV, tales como el FWHM (del inglés *Full-Width Half-Maximum*), que es el ancho máximo a media altura que presenta un determinado pico de emisión. En el caso particular de las imágenes astronómicas, corresponde a una estimación de la calidad de una imagen que mide cuánto el telescopio y la atmósfera han “difuminado” una fuente puntual, en este caso una imagen de una estrella, en varios píxeles del CCD. Además la tabla incluye magnitudes límites y el brillo de cielo característico para los diferentes filtros pertenecientes a VIRCAM. En la Figura 3.3 se presentan las curvas de transmisión para las bandas Z, Y, J, H y K_s , donde se ve superpuesta en violeta la curva de eficiencia cuántica (QE). La longitud de onda efectiva que tiene cada uno de estos filtros puede apreciarse en la Tabla 3.2. Todas estas características ópticas e instrumentales transforman al sistema VISTA+VIRCAM, en un instrumento de competencias únicas, permitiendo a astrónomas y astrónomos estudiar y analizar las fuentes extragalácticas oscurecidas por la Vía Láctea, para de esta manera, completar el mapa en gran escala del Universo en la ZoA.

Tabla 3.2: Características fotométricas de VVV

	Z [mag]	Y [mag]	J [mag]	H [mag]	K_s [mag]
λ_{eff} (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 del cielo	18.2	17.2	16.06	14.1	13.0

3.1.2. Fotometría CASU

Una vez que las imágenes son obtenidas por VISTA+VIRCAM, estas son transferidas al *Cambridge Astronomy Survey Unit*, o CASU. Esta unidad es la encargada del pre-procesamiento y eliminación de ruido instrumental. Esto incluye la substracción de *dark*, correcciones de anomalías, aplanar el campo, substracción inicial del cielo, entre otros (Irwin et al. 2004). Los catálogos que genera CASU proveen entonces imágenes pre-procesadas cada día para cada relevamiento de VISTA, donde se incluyen objetos detectados con sus respectivas posiciones,

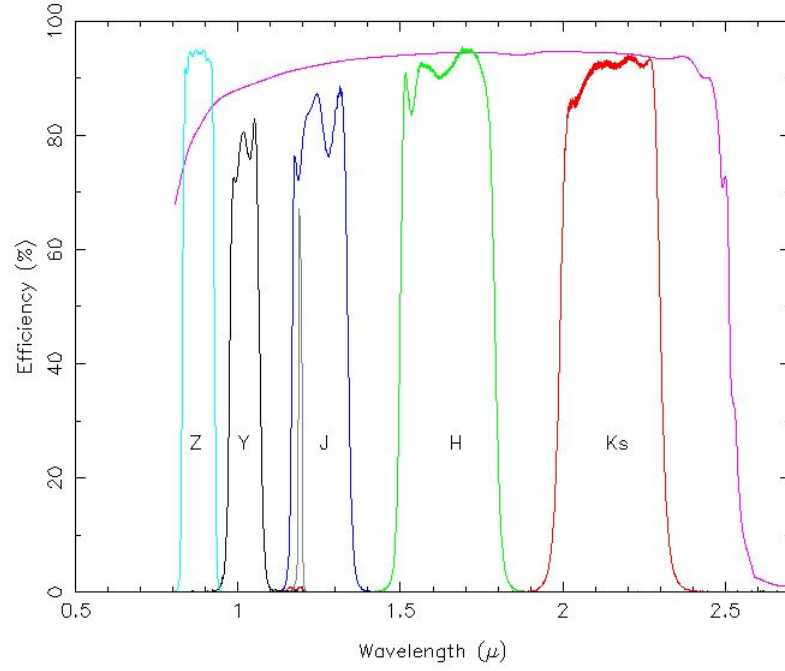


Figura 3.3: Curvas de transmisión para los filtros Z, Y, J, H y K_s en la cámara VIRCAM. Se muestra además la curva de Eficiencia Cuántica (QE) del detector de muestra superpuesta en color violeta.

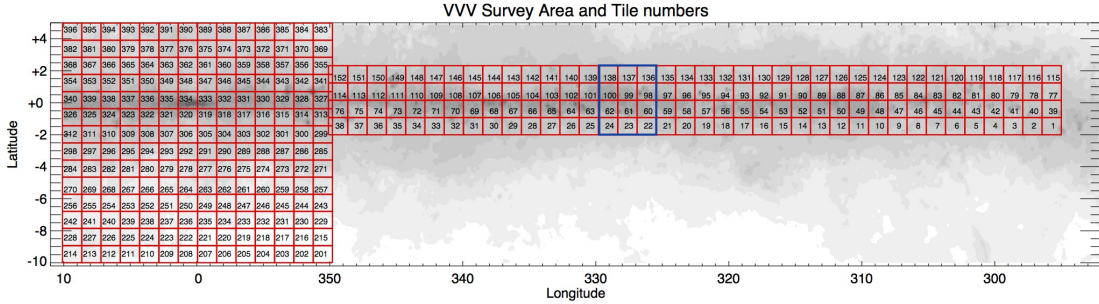


Figura 3.4: Esquema de la distribución de *tiles* para la cobertura del relevamiento VVV en coordenadas Galácticas. En el rectángulo azul puede apreciarse el área seleccionada para el estudio.

flujos y algunas medidas obtenidas utilizando diferentes aperturas. Cada objeto además incluye el parámetro denominado “*flag*”, que indica la clasificación morfológica más probable, donde el valor $flag = -1$ corresponde a objetos estelares; $flag = +1$ como no estelares; $flag = -2$ a objetos compactos; $flag = -7$ a objetos con píxeles dañados; $flag = -9$ a objetos saturados; y $flag = 0$ a ruido (Saito et al. 2012).

Los flujos obtenidos en los catálogos fotométricos generados por CASU en las diferentes aperturas son convertidos a magnitudes con la siguiente ecuación:

$$mag = ZP - 2.5 \log_{10}(flux/exptime) - apcor - percorr \quad (3.1)$$

Aquí, ZP es el punto cero, $apcor$ la corrección por apertura y $percorr$ la corrección basada en la oscuridad media del cielo. Todos estos valores y características fotométricas pueden encontrarse en los encabezados de cada observación, disponibles en la base de datos de CASU¹.

3.1.3. Selección de la región a estudiar

Como se había mencionado en la Introducción, múltiples intentos se han realizado desde el punto de vista observacional para localizar en la ZoA fuentes extragalácticas pertenecientes a la LSS del Universo cercano, esto con el fin de tener un mejor entendimiento de los flujos locales y el CMB. Para ello, se han llevado a cabo estudios que intentan predecir las estructuras en la región (Sorce et al. 2016, 2017), así como también análisis dinámicos, fotométricos y espectroscópicos en el cúmulo más masivo del Gran Atractor (Woudt et al. 2008; Skelton et al. 2009; Mutabazi et al. 2014; Mutabazi 2021).

Ya que es de nuestro interés estudiar la Estructura a Gran Escala en el Universo cercano, esta tesis se centra en el análisis y estudio de una región estratégica en la ZoA cubierta por 12 *tiles*, con un área total de 18 grados cuadrados adyacente al Cúmulo de Norma; ACO 3627 centrado en $(l, b) \sim (325^\circ, -7^\circ)$.

En la Figura 3.4 puede apreciarse la región correspondiente a los *tiles* del relevamiento VVV, mientras que enmarcado en el rectángulo azul se encuentra el área seleccionada en el presente estudio. De la misma manera, en la Tabla 3.3 se detallan los *tiles* utilizados en este trabajo incluyendo sus identificadores, coordenadas Galácticas de los centros de cada *tile*, y los valores de extinción promedio para el centro de cada *tile*. Cabe destacar que estos valores fueron obtenidos utilizando los mapas de extinción Galáctica de Schlafly & Finkbeiner (2011).

¹<http://casu.ast.cam.ac.uk/vistasp/>

Tabla 3.3: *Tiles* a estudiar en la región del Cúmulo de Norma

Tile ID	Coordenadas Galácticas [grados]	A_V [mag]	A_{K_s} [mag]
d022	(326.0489; -1.6497)	3.653	0.431
d023	(327.5079; -1.6497)	4.355	0.514
d024	(328.9669; -1.6497)	3.024	0.357
d060	(326.0695; -0.5575)	42.993	5.073
d061	(327.5282; -0.5576)	29.493	3.480
d062	(328.9868; -0.5576)	24.145	2.849
d098	(326.0736; 0.5346)	25.883	3.054
d099	(327.5325; 0.5346)	33.170	3.914
d100	(328.9913; 0.5346)	79.079	9.331
d136	(326.0891; 1.6268)	6.649	0.785
d137	(327.5487; 1.6268)	11.189	1.32
d138	(328.3753; 1.6268)	38.469	4.539

Capítulo 4

Procedimiento Fotométrico

Vivimos en una era donde los avances de la tecnología nos han llevado a un incremento exponencial en la cantidad de datos astronómicos que manejamos, y como consecuencia, hemos tenido que forzosamente evolucionar desde el *megabyte* al *terabyte* en menos de una década. Esto nos lleva a un paradigma en la forma que trabajamos en la astronomía, pues las necesidades computacionales ya no son las mismas que hace veinte años. Cuando estudiamos y catalogamos objetos astronómicos desde grandes volúmenes de datos, enfrentamos un desafío importante: debemos extraer información útil a partir de las imágenes de telescopio. Esto implica que en primera instancia debe hacerse una detección de la mayor cantidad de objetos posible; minimizar la contaminación de nuestra muestra; clasificar las fuentes según su identificador (Ej: Si se trata de un objeto extendido o una estrella); lidiar con el ruido y el fondo; extraer los objetos de interés; medir con precisión las cantidades fotométricas y astrométricas, etc. Luego, recién podemos avocarnos al análisis. Y todo este trabajo no es trivial.

La importancia de los catálogos es que permite trabajar de manera estadística con muestras grandes por medio de parámetros u “observables”, transformándose en nuestra principal fuente de información en lugar de las imágenes, y por ende, se vuelve imperioso automatizar los métodos de extracción.

Dentro de las principales herramientas que tenemos para extraer fuentes de imágenes astronómicas, se encuentran **SExtractor v2.19.1** (SE de *Source Extractor*; Bertin & Arnouts 1996) y **DAOPHOT** (Stetson 1987). SExtractor es un programa que construye un catálogo de objetos a partir de una imagen astronómica, y aunque ha sido principalmente utilizado en estudios extragalácticos, última-

mente se ha logrado implementar con éxito en regiones estelarmente pobladas (Coldwell et al. 2014; Galdeano et al. 2021). Por otro lado, DAOPHOT es un programa orientado para llevar a cabo fotometría estelar en campos muy poblados. Su método de detección utiliza la *point-spread function* (PSF) del instrumento, trata de ajustar una estrella a cada pixel de la imagen, y encuentra cuáles píxeles son posibles estrellas. Para esto DAOPHOT se usa a menudo en compañía de ALLSTAR (Stetson 1994), con el fin de generar catálogos estelares de precisión.

Aunque inicialmente SExtractor no producía fotometría a partir de la PSF como es el caso de DAOPHOT, se lanzó posteriormente una herramienta llamada PSFEx v3.17 (PSF Extractor; Bertin 2011), donde pueden extraerse modelos precisos de la PSF a partir de imágenes que previamente son procesadas por SExtractor.

Annunziatella et al. (2013) compara en su trabajo la eficiencia de SExtractor + PSFEx en la detección y separación de fuentes puntuales de las extensas, analizando la completitud y confiabilidad de los catálogos entregados por esta combinación de herramientas con aquellos generados por DAOPHOT y ALLSTAR. Los autores concluyen finalmente que SExtractor + PSFEx es la combinación adecuada para el análisis de galaxias, mientras que DAOPHOT y ALLSTAR proveen una excelente solución para fotometría de campos estelares, tal como lo es VVV. Un ejemplo de este último caso, es el trabajo presentado por Mauro et al. (2013), donde los autores producen catálogos de fuentes puntuales en VVV a través de la fotometría realizada con DAOPHOT.

En Baravalle et al. (2018) se basan en los resultados de Annunziatella et al. (2013) para generar un *pipeline* morfo-fotométrico que pueda ayudar en la búsqueda sistemática de fuentes extragalácticas en el relevamiento VVV. Aplican la combinación de SExtractor + PSFEx a dos *tiles*, d010 y d115 en las cinco bandas de VVV (Z, Y, J, H y K_s), obteniendo parámetros astrométricos, fotométricos y morfológicos de todas las fuentes detectadas. Para definir los candidatos extragalácticos de su muestra, adoptan un criterio que incluye parámetros estructurales y utilizan cortes de color para eliminar falsas detecciones. Finalmente tras una minuciosa inspección visual, reportan 530 galaxias que en su mayoría son pequeñas, rojas y más circulares, esto según la sensibilidad del infrarrojo cercano para seleccionar objetos más compactos y con mayor brillo superficial.

Para el propósito de esta tesis (que es la de detectar y caracterizar galaxias a través de la VL), utilizamos el conjunto **SExtractor v2.19.1 + PSFEx v3.17** y la metodología descrita por Baravalle et al. (2018) para generar un nuevo catálogo de galaxias en la dirección del Puente de Norma.

4.1. SExtractor

Como habíamos mencionado anteriormente, SExtractor es un programa utilizado para la detección automática de fuentes, y es capaz de generar catálogos completos con una serie de parámetros astrométricos, fotométricos y morfológicos. Una de las principales ventajas que ofrece SE es su velocidad, ya que puede trabajar a través de varios grados cuadrados de datos y procesar bastante rápido imágenes muy pesadas. Y por otro lado, tenemos su flexibilidad, pues es posible configurar los archivos de ejecución del programa según las necesidades del usuario.

¿Cómo funciona? SExtractor trabaja en una serie de pasos. En primera instancia, determina el fondo de cielo, y discrimina si los píxeles pertenecen al fondo o a los objetos. Una vez detectados los objetos, son extraídos respecto al fondo. Posteriormente se identifican y separan los objetos próximos, para finalmente determinar las propiedades de cada objeto en base al flujo total integrado en el grupo de píxeles que identifica como fuentes, guardándolos en un catálogo. A continuación se describen con mayor detalle los pasos que conforman el proceso llevado a cabo por SExtractor.

4.1.1. Estimación del *background*

Para poder obtener apropiadamente la cantidad de luz que proviene de cada objeto particular, es importante determinar el *background* o fondo de cielo para cada píxel.

Para ello, el programa divide la imagen en una grilla y estima del fondo de cielo en cada una de las mallas de la grilla. Es posible usar filtros que pueden ajustar los valores del *background* para evitar sobreestimaciones como sucede en el caso de tener estrellas brillantes en ciertas regiones.

También es posible cambiar los parámetros para elegir el tamaño (`BACK_SIZE`) y número de las mallas de la grilla sobre el cual se calcula el fondo. Esto resulta

de gran ayuda para los dos casos límites: Si el tamaño de la malla es muy grande, el algoritmo no podrá determinar apropiadamente las variaciones de escala en el *background*. Y en el caso contrario, si es muy pequeño, luego la estimación del fondo de cielo estará en gran medida afectada por el flujo de objetos individuales. Al igual que en el trabajo de Baravalle et al. (2018), escogemos un tamaño para la malla de la grilla de 8 píxeles.

4.1.2. Detección

La detección de objetos es un paso fundamental en el procesamiento de imágenes astronómicas, ya que se necesita encontrar con alta precisión la ubicación de las fuentes y además poder diferenciarlos de otros elementos espurios.

Sin asumir la forma de los objetos, existen diferentes métodos para llevar a cabo una detección. Entre los más usados se encuentra *peak finding* y el *thresholding*. Mientras que el primer método se considera más apropiado para la detección de estrellas, ya que no es apto para la detección de objetos de bajo brillo superficial (Yee 1991), el *thresholding* considera píxeles con intensidad de luz por encima de cierto valor o umbral como parte de los objetos. Esta área mínima en píxeles y el umbral de detección se pueden detallar en los archivos de configuración. En este caso, SExtractor utiliza un estimador similar al empleado en DAOPHOT (ver por ejemplo, Da Costa 1992), como una combinación de $\kappa.\sigma$ -clipping y la estimación de la moda (Bertin & Arnouts 1996). El *threshold* entonces es escogido como $\kappa.\sigma$, donde κ es un número arbitrario constante, usualmente usado entre los valores 1 y 3.

Para este trabajo se utilizó un umbral definido por el flujo en la banda K_s de 1.0σ (el mínimo de píxeles adyacentes) por sobre el fondo de cielo, siendo σ la dispersión del mismo.

Filtros de convolución

Antes de la detección de píxeles por encima del *threshold*, existe la opción de aplicar un filtro. Esto ayuda a disminuir la influencia del ruido en la detección. Usualmente estos filtros son similares a la PSF utilizada, donde los objetos en la imagen no tienen una resolución más pequeña que la de la PSF. En el caso de las estrellas, que son representadas como fuentes puntuales, los datos de la imagen

tendrán la forma de la PSF, de modo que convolucionar la imagen a una función del estilo PSF será una opción adecuado para mantener la señal de los objetos (Irwin 1985).

En SExtractor también se pueden aplicar filtros de convolución. Existen cuatro tipos de filtros: Gaussiano, *Mexican hat*, *Tophat* y función de bloque de varios tamaños. La elección de esta dependerá de las características de la imagen, la morfología de los objetos de estudio, condiciones atmosféricas y región de interés, y es de gran utilidad para separar los objetos de bajo brillo superficial de las falsas detecciones. Como veremos en el Capítulo 5, en la Sección 5.2 de inspección visual, estos objetos espurios pueden aparecer en la forma de “cuncunas” (estrellas dobles o triples apegadas una al lado de la otra), como también inhomogeneidades, rayos cósmicos, *spikes* en estrellas muy brillantes, etc.

Para este trabajo se utilizó el filtro Gaussiano siguiendo lo descrito en Baravalle et al. (2018), ya que al tratarse de un conjunto de funciones gaussianas favorecen la detección de objetos extensos y débiles tal como las galaxias que nos interesa estudiar. La función fue definida en 5×5 píxeles con una máscara de convolución de FWHM de 3 píxeles.

4.1.3. Separación de objetos o *deblending*

En un campo con alta densidad estelar es natural encontrar apiñamiento de estrellas, entonces, realizar el *deblending* es necesario para separar a esos “vecinos” que han sido extraídos por el algoritmo como una sola fuente.

Para objetos fusionados, SExtractor usa un algoritmo que aplica una técnica de análisis de múltiples isofotas que depende del número de niveles en el que se divide el perfil (Beard, MacGillivray, & Thanisch 1990). En este proceso SE decide si un grupo de píxeles adyacentes por encima de un umbral es un único objeto, o se trata de varios, y entrega un “modelo” de la distribución de luz para los objetos que se almacena en la forma de una estructura de árbol (Ver Figura 4.1). Este proceso es muy importante y donde varios programas de extracción fallan. Debe ser tratado con cuidado, de otra forma, podría conllevar a catálogos con galaxias extendidas que se encuentran divididas en varias detecciones más pequeñas.

Para este trabajo el número de niveles utilizado fue de 64, y el contraste mínimo con el cual se mejora la separación de objetos superpuesto de 0.002.

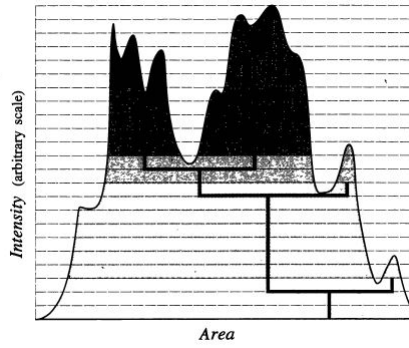


Figura 4.1: Diagrama esquemático del método usado para separar objetos compuestos o *deblending* (Bertin & Arnouts 1996). El perfil del objeto (curva suave) puede ser descrito como la estructura de un árbol (líneas gruesas). La decisión si una de las ramas pertenece a un objeto distinto está determinada de acuerdo a la intensidad relativa integrada (área en negro). En el caso que se presenta en la imagen, el objeto original se divide en dos componentes A y B. Los píxeles que yacen bajo la separación del *threshold* son posteriormente asignados al “progenitor” más probable.

4.1.4. Fotometría

La fotometría es un proceso de medición del flujo exacto o intensidad que proviene de cada objeto en una imagen astronómica.

Existen varios tipos de magnitudes que se pueden calcular con SExtractor. La primera es *magnitud isofotal* (*MAG_ISO*), que corresponde al flujo dentro del área isofotal del objeto (área de píxeles a la altura del umbral de detección) menos la contribución de fondo; la *magnitud de apertura fija* (*MAG_APER*), que corresponde al flujo por encima del *background* dentro de una apertura circular; y la *magnitud isofotal corregida* (*MAG_ISOCOR*), que se utiliza cuando el flujo está en los extremos de la distribución y la magnitud isofotal debe ajustarse, asumiendo que el perfil es aproximadamente Gaussiano simétrico para el objeto.

Cuando tratamos con objetos no estelares, las dos primeras magnitudes mencionadas tienen sus ventajas y desventajas. La fotometría de apertura es conocida por ser menos sesgada que la fotometría isofotal, pero solo funciona bien en zonas con baja densidad estelar. Por último, tenemos un cuarto tipo de magnitud, llamada *magnitud de apertura adaptativa* (*MAG_AUTO*) o también llamada *magnitud de Kron* (Kron 1980), que se calcula utilizando una apertura elíptica que se ajusta alrededor de cada fuente detectada y mide el flujo dentro de ella. Y ya que nuestro interés es el de estudiar galaxias, la *magnitud de Kron* es la que proporciona la estimación más precisa de magnitudes totales. Además, con el fin de dismi-

nir la contaminación estelar, se usaron las magnitudes de apertura circular de 2 segundos de arco de diámetro.

4.1.5. Separación de estrellas-galaxias

Para realizar estudios extragalácticos es esencial discriminar apropiadamente entre estrellas y galaxias. Comúnmente asumimos que las imágenes de galaxias tienden a ser más extendidas que las estrellas, y sin duda esto ha sido confirmado espectroscópicamente por Colless et al. (1990) para una muestra objetos débiles ($b_j \sim 22$ mag) de COSMOS. Luego, para discriminar apropiadamente un objeto, existen múltiples clasificadores de estrellas y galaxias que pueden ser aplicadas. Para separar de manera simple entre estas dos clases, se utilizan estimadores simples, tales como: área de magnitud-isofotal (e.g. Reid & Gilmore 1982), pico de intensidad (e.g. Jones et al. 1991), o brillo superficial (e.g. Harmon & Mamon 1993), aunque fallan al no usar toda la información disponible sobre el perfil de intensidad. Por otro lado, existen estimadores más sofisticados que sí la utilizan. Entre ellos tenemos el clasificador de Sebk (1979), el “momento” de Kron r^{-1} (1980), el clasificador Q de Le Fevre et al. (1986) y el parámetro ψ de Maddox et al. (1990). ¿Cuál es el principal problema? Que todos tienen una falla común: falta de robustez.

Para solucionar este problema, SExtractor utiliza las redes neuronales (conocido en inglés como Neuronal Network; NN), para poder clasificar las fuentes detectadas. La NN de SExtractor caracteriza a cada objeto por medio de 10 parámetros que incluyen áreas isofotales, parámetro del pico de intensidad y parámetro de control de *seeing* de la imagen. Ya que las NN utilizan un sistema de aprendizaje a partir de la repetición de procesos, proporcionan una herramienta elegante y extremadamente robusta para determinar de la mejor manera una frontera entre las estrellas y las galaxias.

El resultado final obtenido a través de las NN se resume en el parámetro o índice de estelaridad **CLASS_STAR**, que toma valores continuos entre 0, en el caso de tener un objeto extenso (galaxia), o 1 si se trata de un objeto puntual (estrella). Este parámetro se interpreta como una probabilidad, de modo que si es más cercano a 0, habrá mayor probabilidad de que se trate de un objeto extenso. Además de este parámetro, SExtractor incluye otro discriminante llamado

SPREAD_MODEL, el cual funciona como separador lineal-normalizado entre el mejor ajuste local del modelo de PSF y el modelo más extendido, realizado por el modelo PSF convolucionado con un modelo de disco exponencial. Según lo reportado por Desai et al. (2012), el mejor valor para la discriminación de estrellas es el de SPREAD_MODEL : $\Phi < 0.003$. Mientras que en el trabajo de Annunziatella et al. (2013) se define el criterio para galaxias como aquellos objetos que cumplan con $\Phi > 0.005$ y $R_{1/2} > 2.0$ segundos de arco. Baravalle et al. (2018) toman como valor para SPREAD_MODEL como un compromiso entre los valores reportados por ambos estudios, escogiendo $\Phi > 0.002$.

En la Figura 4.2 se puede apreciar el diagrama de flujo para el funcionamiento del algoritmo, obtenido de la página de documentación de SExtractor ¹. Cabe destacar la flexibilidad del programa, ya que es posible personalizar varias opciones de configuración y salida según los requerimientos del usuario, que incluyen: *weight map*, *flag-map*, correlación cruzada con catálogos, entre otros.

¹<https://sextractor.readthedocs.io/en/latest/Processing.html>

A modo de resumen, los pasos a realizar por SExtractor son:

1. Medir el fondo de cielo y el ruido RMS asociado.
2. Sustraer el fondo de cielo.
3. Proceso de Filtrado (Filtros de convolución).
4. Detectar objetos (*thresholding*).
5. Separación de objetos vecinos o *deblending*.
6. Medición de formas y posiciones de las fuentes.
7. Limpieza (Reconsidera detecciones tomando en cuenta las contribuciones de sus vecinos).
8. Fotometría.
9. Clasificación: ¿Estrella o galaxia?
10. Catálogo e imágenes de salida.

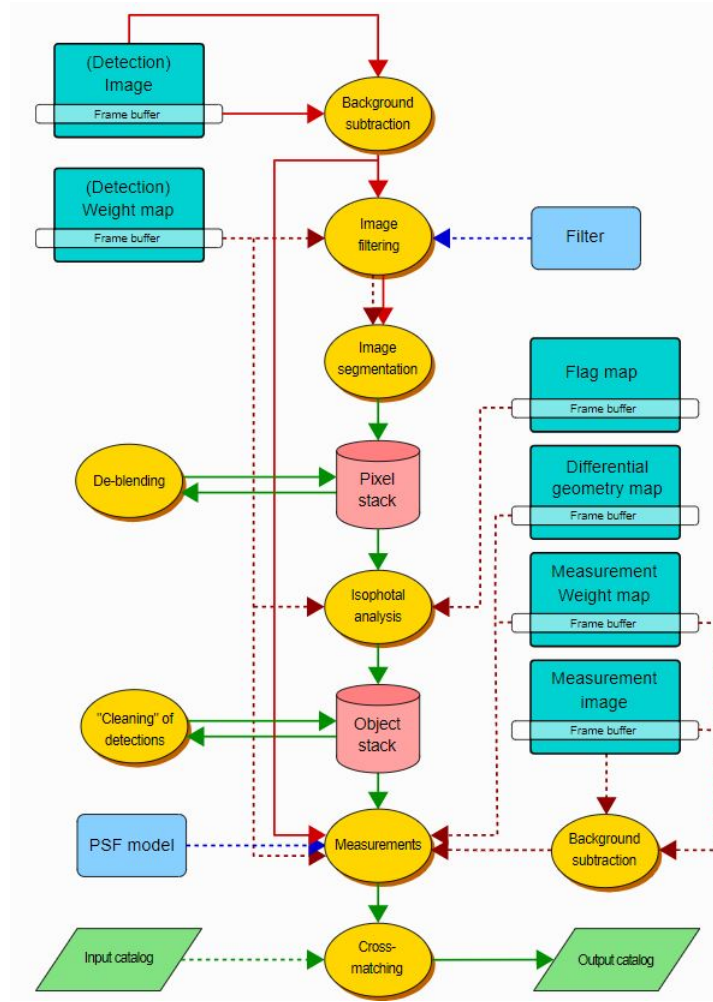


Figura 4.2: Diagrama de flujo del procedimiento del programa, obtenido de la página de documentación de SExtractor. En líneas punteadas se aprecian las entradas de parámetros opcionales.

4.2. SExtractor + PSFEx

Para realizar este trabajo, se ejecutó SExtractor a tres filtros de VVV (J, H y K_s) para los 12 *tiles* escogidos en el área de estudio, esto debido a que la mayoría de las galaxias no poseen contribución de luz en las bandas Z e Y. Además, todas las fuentes detectadas en las bandas J, H y K_s fueron correlacionadas con las imágenes en la banda K_s con una separación máxima entre objetos de 1 segundo de arco, esto debido a la profundidad que alcanza en comparación al resto de la bandas, facilitando la tarea de encontrar la mayor cantidad de objetos. Así, SExtractor genera catálogos que incluyen posiciones, morfología e imágenes para cada una de las fuentes detectadas. Una vez obtenemos los catálogos generado

por SExtractor para J (1.25 μm), H (1.64 μm) y K_s (2.14 μm), PSFEx toma estos datos y crea el mejor modelo de PSF tomando objetos ideales; no saturados ($S/N > 20$), aislados y circulares bien definidos (elongaciones mayores a 0.98). Utilizamos los valores de Baravalle et al. (2018) para aplicar PSFEx sobre la muestra: un kernel de 20×20 píxeles, y variaciones de tercer orden. Además, se utilizó un radio que encierra el 50 % del flujo total del objeto ($R_{1/2}$) entre 0.5 a 0.9 segundos de arco (conocido en inglés como *half-light radius*; Binney & Tremaine 2008), y un modelo de PSF que minimiza el χ^2 entre la distribución de flujo observado y el modelo propuesto.

Como último paso, se aplica este modelo de PSF a través de SExtractor a cada una de las fuentes, y se obtienen así propiedades astrométricas, fotométricas y morfológicas con mayor precisión.

4.2.1. Parámetros fotométricos y estructurales

En el caso de la fotometría mejorada, es importante mencionar que la magnitud obtenida es PSF (*MAG_PSF*) para cada filtro (J, H y K_s). Esta magnitud es una **estimación de la magnitud total** del objeto, ya que se obtiene como una forma “mejorada” de la *MAG_AUTO* una vez se aplicó PSFEx sobre el catálogo de SExtractor, y se define como la magnitud dentro de una apertura elíptica adaptativa que tiene en cuenta el flujo en los extremos de la distribución (Annunziatella et al. 2013). Cabe aclarar que aunque en el trabajo de Baravalle et al. (2018) se utilizó la magnitud PSF como la ideal, luego de varios análisis se comprobó que la magnitud que mejor representa a la de las galaxias es la *MAG_AUTO* (Baravalle et al. 2021).

A continuación se describen los parámetros proporcionados a partir del flujo total luego de aplicar la combinación SExtractor+PSFEx.

- *Half-light radius* ($R_{1/2}$): Es un indicador para el tamaño del objeto. Se trata del radio que contiene el 50 % del flujo total de la fuente.
- Elipticidad (e) y Elongación: Se tratan de parámetros geométricos que describen la forma y el tamaño del objeto. El estiramiento se puede parametrizar ya sea con la elipticidad y elongación, los cuales se calculan simplemente

a partir de los ejes mayor (A) y menor (B).

$$ELONGATION = \frac{A}{B} \quad (4.1)$$

$$ELLIPTICITY = 1 - \frac{B}{A} = 1 - \frac{1}{ELONGATION} \quad (4.2)$$

- **CLASS_STAR**: Como se había mencionado anteriormente, **CLASS_STAR** es un parámetro clasificador. Obtiene el valor 0 si se trata de una fuente no estelar (como galaxia u otro objeto extendido), y un 1 si es estelar.
- **SPREAD_MODEL(Φ)**: Es un discriminante lineal-normalizado que sirve como separador de estrellas y galaxias según lo reportado por el trabajo de Desai et al. (2012).
- **Índice de Concentración (C; Conselice, Bershadsky, & Jangren 2000)**: Es calculado como la relación de dos radios circulares que contienen el 80 % y 20 % del flujo total Petrosiano.
- **Índice de Sérsic (n)**: El perfil de Sérsic (Sersic 1968) es una función matemática que describe el perfil de luz de las galaxias y sus componentes; y se encuentra definido por:

$$I^S(r) = I_0 e^{-b_n \left(\frac{r}{R_e}\right)^{1/n}} \quad (4.3)$$

donde I_0 es la intensidad en el centro del objeto, n es el llamado índice de Sérsic, y R_e es el radio efectivo definido como el radio que encierra la luminosidad integrada igual a la mitad de la luminosidad total del objeto. Aquí el valor de b_n ayuda a definir R_e y depende de n . El índice de Sérsic es sin duda uno de los parámetros más importantes, y sus valores se pueden asociar a diferentes perfiles. En el caso del perfil de Vaucouleurs tenemos $n = 4$ (de Vaucouleurs 1948), mientras que si tenemos un perfil exponencial su valor será de $n = 1$. Así, el valor de n se puede ajustar para estudiar los tipos morfológicos de galaxias.

En el caso del parámetro n entregado por la combinación de SExtractor+PSFEx, se calcula un modelo para la componente simple del perfil de

brillo usando un ajuste de Sérsic convolucionado con el modelo de PSF.

Luego, para estudiar la naturaleza de los objetos extendidos detectados por el algoritmo, se pueden estimar los colores utilizando la magnitud de apertura (*MAG_APER*) para una apertura circular de 2 segundos de arco de diámetro. Esta apertura fue escogida según Baravalle et al. (2018) de modo que pudiera disminuirse la contaminación estelar en la ZoA.

Finalmente, los parámetros mencionados anteriormente tales como: *CLASS_STAR*, Φ , $R_{1/2}$ y *C*, junto a los cortes de color serán utilizados en el Capítulo 5 para discriminar las fuentes puntuales de los objetos extendidos y candidatos extragalácticos y eliminar las falsas detecciones.

Capítulo 5

Catálogo de Objetos Extragalácticos

En este capítulo se describirá brevemente el desarrollo del proceso de clasificación para las distintas fuentes presentes en nuestros catálogos, y la identificación de cada uno de ellos a través de la inspección visual para garantizar la naturaleza de los objetos extragalácticos. Los catálogos sobre los cuales se realiza la selección, se obtienen aplicando la combinación de SExtractor+PSFEx sobre 12 *tiles*, siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 3.

5.1. Clasificación de objetos

El proceso de separación de fuentes puntuales versus fuentes extensas se logró aplicando la técnica (y rango de valores para parámetros) de clasificación morfológica descrita por Baravalle et al. (2018) a las imágenes en la banda K_s , esto por la profundidad fotométrica alcanzada en el relevamiento en esta banda. Cada una de las fuentes extensas deben cumplir con las siguientes condiciones para ser consideradas como fuentes extragalácticas a partir del catálogo generado por SExtractor+PSFEx:

- $\text{CLASS_STAR} < 0.3$
- $\Phi > 0.002$
- $1.0 < R_{1/2} < 5.0$ segundos de arco
- $2.1 < C < 5$

Ya que la ZoA es una región alta densidad estelar, es importante señalar que existen métodos y herramientas para sustraer las estrellas en el campo adyacente a las galaxias. Como ejemplo, Williams, Kraan-Korteweg, & Woudt (2014) utilizaron la herramienta llamada KILLALL (Buta & McCall 1999), perteneciente al paquete DAOPHOT para realizar dicha tarea. En su trabajo, cuyo objetivo es la estimación más precisa de las magnitudes galácticas, es posible ver la inmensa mejoría en la clasificación morfológica de las fuentes extragalácticas una vez han sido sustraídas las estrellas más cercanas. Por otro lado, en el trabajo de Baravalle et al. (2018) se encontró que un 10 % de las fuentes extensas detectadas por SExtractor+PSFEx en dos *tiles* de estudio, d010 y d115, cuentan con contaminación por presencia de estrellas cercanas. Para sustraer las estrellas de la imagen y corregir las fuentes, se utilizó una rutina similar a KILLALL, usando el paquete DAOPHOT y la tarea SUBSTAR. Sin embargo, ya que trabajan utilizando imágenes del relevamiento VVV, las fuentes se encuentran en una zona aún más poblada de objetos estelares a medida que se acercan al plano Galáctico. Finalmente, Baravalle et al. (2018) concluyen que la aplicación de esta herramienta no podría conseguir una correcta separación de fuentes extensas y estrellas, y se podría perder importante información fotométrica de las galaxias, esto debido a que en la banda K_s tanto las estrellas como las galaxias poseen un alto brillo superficial.

5.1.1. Corrección por extinción Galáctica

Cuando buscamos detectar y caracterizar galaxias a través del disco de la VL, nos encontramos con un importante problema: gas y polvo con densidades variables a lo largo de cada una de las posibles líneas de visión.

Las observaciones en infrarrojo cercano son una gran ayuda cuando se trata con este problema, ya que la extinción depende de la longitud de onda. Sin embargo, el efecto no es despreciable y se plantea una solución para este inconveniente. Hoy en día nos basamos en mapas de extinción Galáctica que nos ayudan a estudiar la distribución del polvo. Dentro de estos esfuerzos cabe mencionar los mapas de Schlegel, Finkbeiner, & Davis (1998), quienes utilizaron los datos de COBE/DIRBE e IRAS para construir un mapa de todo el cielo en $100\mu m$. En particular Schröder et al. (2007), van Driel et al. (2009) y Schröder et al. (2019)

utilizaron estos valores para obtener las magnitudes corregidas por extinción. Sin embargo en Baravalle et al. (2018, 2019, 2021) y en este trabajo, utilizamos los mapas de Schlafly & Finkbeiner (2011). Estos consisten en una recalibración de los mapas de Schlegel et al. (1998), donde se derivó la extinción asumiendo la ley de enrojecimiento de Fitzpatrick constante (Fitzpatrick 1999) con $R_v = 3.1$ para un medio interestelar difuso (Mathis 1990).

Además, como combinación al recurso de los mapas de extinción, se usaron los coeficientes de extinción relativa para la corrección de las magnitudes y colores en las bandas J, H y K_s del relevamiento VVV, extraídos de trabajo de Catelan et al. (2011): $A_J = 0.280 A_V$, $A_H = 0.184 A_V$, y $A_{K_s} = 0.118 A_V$.

A lo largo de este trabajo se utilizará la notación para las magnitudes y colores corregidos por extinción Galáctica con subíndice (MAG)_o.

5.1.2. Criterio de Color

Para disminuir las falsas detecciones entregadas por el algoritmo, fue necesario considerar un criterio de color además de los parámetros morfológicos definidos en el capítulo anterior. Para ello, tomamos los colores (J- K_s), (J-H) y (H- K_s) derivados de la magnitud de apertura fija para una apertura circular de 2 segundos de arco de diámetro y corregidos por extinción Galáctica. Luego, se tomaron los cortes en colores considerados en Baravalle et al. (2018):

- $0.5 < (J-K_s)_o < 2.0 \text{ mag}$
- $0.0 < (J-H)_o < 1.0 \text{ mag}$
- $0.0 < (H-K_s)_o < 2.0 \text{ mag}$
- $(J-H)_o + 0.9(H-K_s)_o > 0.44 \text{ mag}$

Estos cortes en colores resultan de gran utilidad para discriminar objetos puntuales de los extragalácticos. Otros autores han utilizado diagramas color-color para establecer un criterio de separación (Amôres et al. 2012; Jarrett et al. 2000a,b) dados diversos objetos espurios como estrellas dobles o triples que presentan brillo superficial comparable al de las galaxias. Así, se presentan colores intrínsecamente rojos para definir la naturaleza de las fuentes extragalácticas.

5.2. Inspección Visual

Junto al criterio de color brevemente descrito en la sección anterior, todos los candidatos a galaxias obtenidos tras aplicar el procedimiento deben someterse a una minuciosa inspección visual, ya que trabajamos en un área altamente contaminada con polvo e importante densidad estelar. Para realizar este proceso se utilizó el modo MULTIGETIMAGE de VISTA *Science Archive* (VSA, ver Figura 5.1)¹, para descargar el catálogo visual de todos los candidatos en las 5 bandas del relevamiento VVV. Para esta inspección se solicitó un tamaño de imagen de 0.5×0.5 minutos de arco cuadrados.

Select the programme/survey you wish to use:	VVV: VISTA Variables in the Via Lactea	
Database release to use:	VVVDR5	
Source waveband	Z - ☒ Y - ☒ J - ☒ H - ☒ Ks - ☒	
ID column	multiframeID	optional, used to specify the frame to be used
Size (arcmin)	0.5	max 12 arcmin
Email:		
confirm Email:		
File of coordinates:	Seleccionar archivo all_extragalactic.cat	max 500 lines, max total area 500 sq. arcmin e.g. 500 1x1 or 20 5x5 images
cross hair:	yes	mark the position on the jpeg image?
Mode:	standard	

Figura 5.1: Forma MULTIGETIMAGE de VSA para obtener imágenes visuales desde catálogos con coordenadas ecuatoriales.

En la Figura 5.2 pueden apreciarse distintos ejemplos de falsas detecciones que se obtuvieron en el *tile* d023 centrado en $(l, b) = (327.5079^\circ; -1.6497^\circ)$. En el área se tiene una extinción promedio de $A_{K_s} = 0.514$ mag, sin embargo se presentaron diversos objetos espurios que fueron detectados por el procedimiento morfo-fotométrico como fuentes extragalácticas, esto debido a la importante densidad estelar en el plano de nuestra Galaxia. En este caso, se presentan estrellas dobles y triples como “cuncunas”, asemejándose a galaxias. Cabe destacar que este tipo de objetos pueden ser eliminados de la muestra ya que presentan detecciones en las cinco bandas del relevamiento y su tamaño permanece inalterable en todas ellas.

¹<http://vsa.roe.ac.uk/>

Por otro lado, vemos ejemplos de candidatos a galaxias en la Figura 5.3 para el *tile* d023 bajo las mismas condiciones de densidad estelar. Puede apreciarse en las bandas de longitud de onda más corta que la detección de las fuentes es más débil, mientras que tanto su tamaño como brillo aumentan a medida que nos acercamos hacia las bandas más rojas (H y K_s).

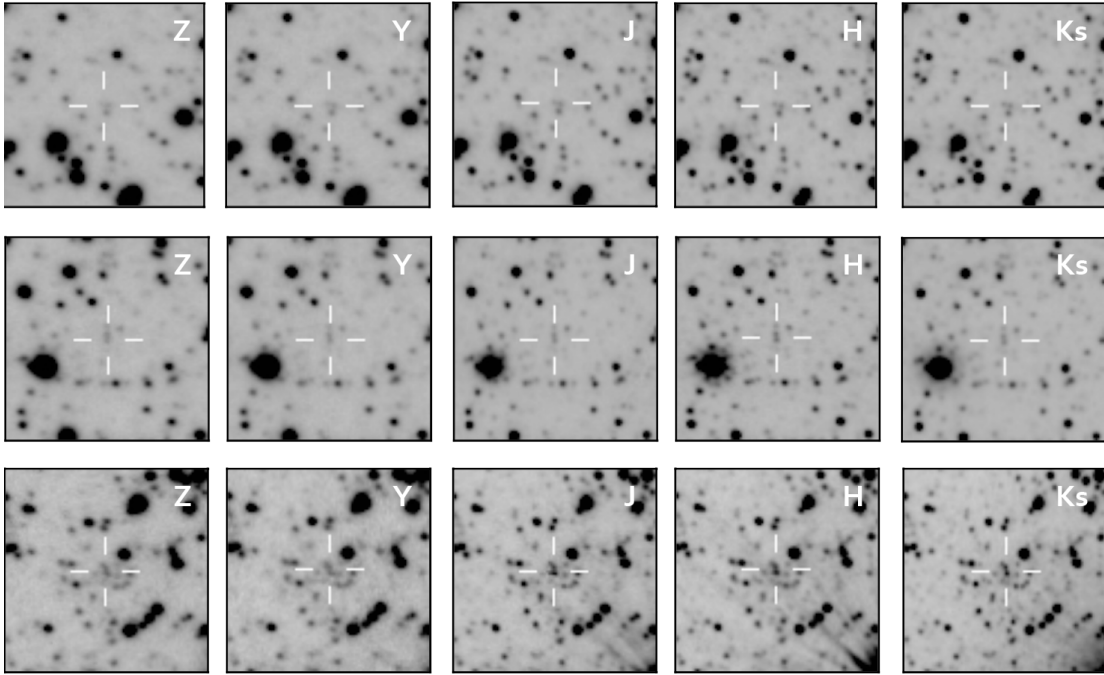


Figura 5.2: Ejemplos de falsas detecciones que fueron entregadas por el algoritmo luego de aplicar el procedimiento morfo-fotométrico, correcciones y criterio de color. Cada imagen tiene un tamaño de 0.5×0.5 minutos de arco cuadrados, y los objetos están orientados en coordenadas ecuatoriales.

Además, cuando se presentan discrepancias o dudas sobre algún objeto particular observando las imágenes por banda de VSA, se realiza una inspección en imágenes a color generadas con la composición de las bandas J, H y K_s utilizando la herramienta de visualización de datos astronómicos SAOImage DS9 (Joye & Mandel 2003), tal como puede apreciarse en la Figura 5.4 para galaxias confirmadas visualmente en el *tile* d023. En este caso puede notarse con mayor claridad la naturaleza de los objetos, su morfología y el contraste que genera con el campo adyacente.

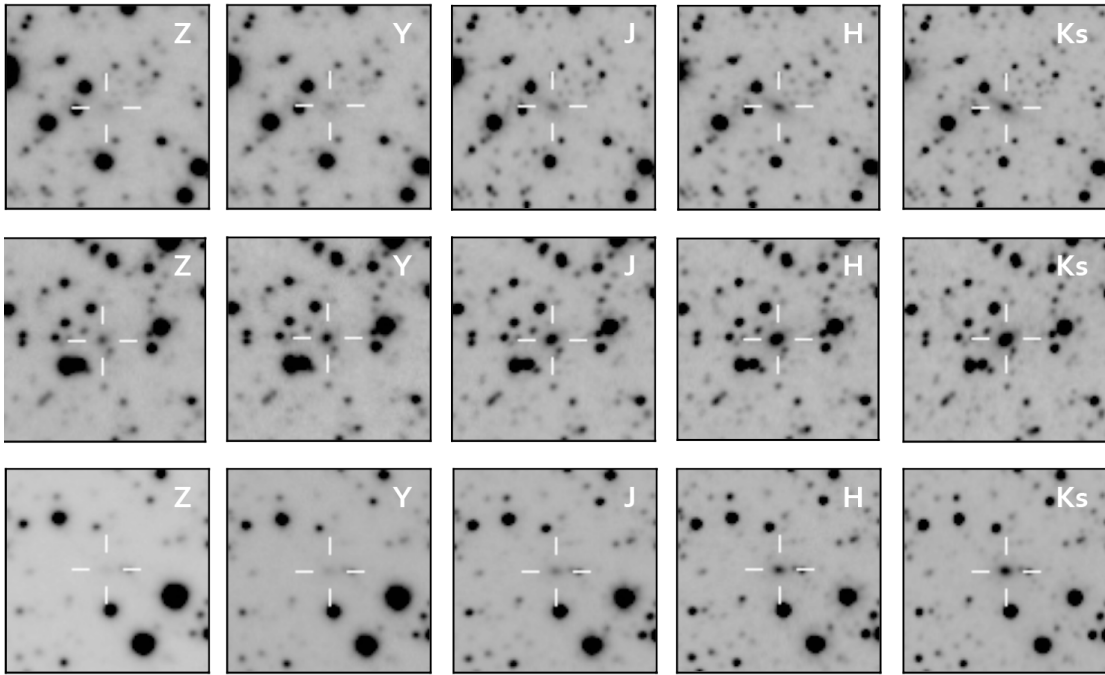


Figura 5.3: Ejemplos de galaxias confirmadas por inspección visual en las 5 bandas de VVV: Z, Y, J, H y K_s , para el *tile* d023. Cada imagen tiene un tamaño de 0.5×0.5 minutos de arco cuadrados, y están orientadas en coordenadas ecuatoriales.

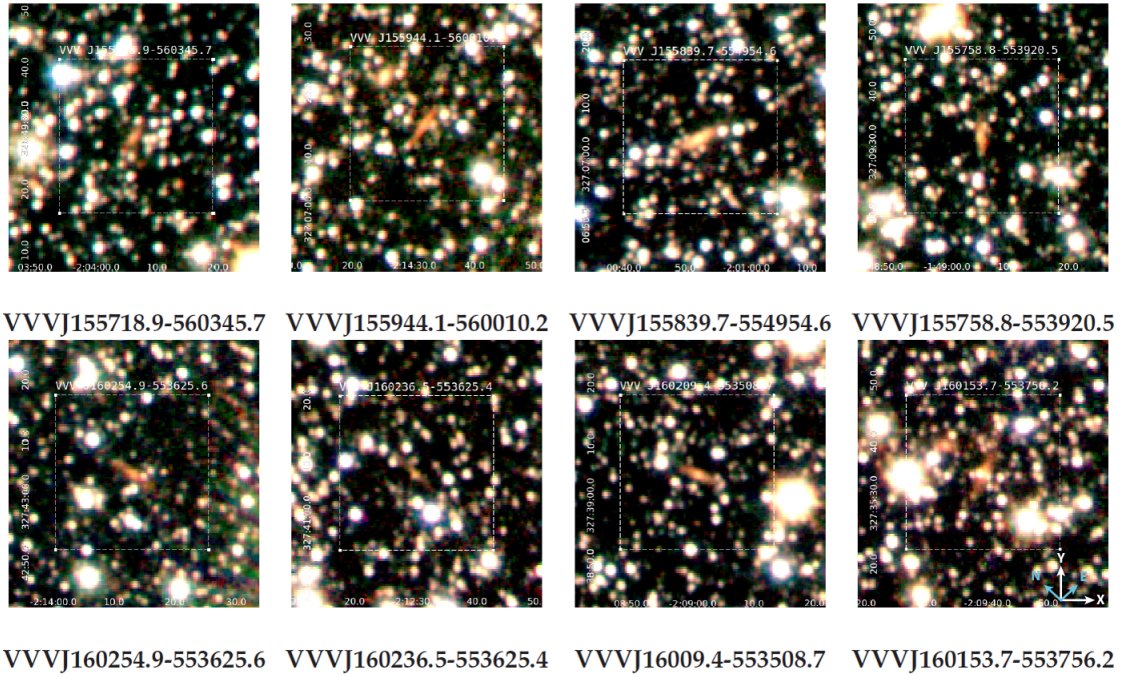


Figura 5.4: Imágenes de color compuestas por las bandas J, H y K_s de algunos ejemplos de galaxias confirmadas por inspección visual obtenidas al aplicar el procedimiento descrito en Baravalle et al. (2018) para el *tile* d023. Cada imagen tiene un tamaño de 44×44 segundos de arco, mientras que el cuadrado interno para cada objeto es de 25×25 segundos de arco. Las imágenes están orientadas en coordenadas Galácticas.

5.3. Resumen

Finalmente, a modo de resumen, se muestra el Diagrama de Flujo (Ver Figura 5.5) para el procedimiento morfo-fotométrico descrito en Baravalle et al. (2018), en conjunto con discriminantes y parámetros morfológicos para separar fuentes puntuales de extensas, y posteriormente criterios de color para generar un catálogo de candidatos extragalácticos. Una vez han sido inspeccionados visualmente, pueden confirmarse como candidatos a galaxias. Estos objetos demuestran estar más enrojecidos que otras fuentes presentes en el campo de estudio, además de presentar una mayor elongación.

En la Tabla 5.1 se observan los resultados para los diferentes *tiles* del área seleccionada para este trabajo. En la primera columna se tiene el identificador del *tile*. En la segunda columna, las coordenadas Galácticas del centro del *tile*. En la tercera y cuarta columna vemos la extinción promedio para el centro del *tile* en la banda V y banda K_s . Luego, en la quinta columna tenemos los objetos que han sido seleccionados tras aplicar el algoritmo de Baravalle et al. (2018) como candidatos extragalácticos, y por último, el número de galaxias confirmadas para cada región por inspección visual, obteniendo un total de 358 galaxias en la muestra. Cabe señalar que en el *tile* d100 no se detectaron candidatos extragalácticos ni galaxias a través del algoritmo por la alta extinción ($A_{K_s} = 9.331$). En el *tile* d099, tras la inspección visual, se descartaron los 78 candidatos extragalácticos, los que resultaron ser conjuntos de estrellas dobles, triples y sistemas estelares más complejos por superposición (“cuncunas”), catalogados erróneamente debido a la alta densidad de estrellas en el plano Galáctico.

A lo largo de este trabajo se le llamará “candidatos extragalácticos” a las fuentes que han sido obtenidas tras aplicar el procedimiento morfo-fotométrico descrito en Baravalle et al. (2018). Por otro lado, denominaremos “candidatos a galaxias” o “galaxias confirmadas por inspección visual” a aquellos objetos de naturaleza extragaláctica que han sido confirmados como galaxias luego de analizar las imágenes entregadas por VSA en las bandas J, H y K_s , además de las imágenes de color compuestas con dichas bandas en DS9.

Tabla 5.1: Resumen de los candidatos extragalácticos y las galaxias confirmadas visualmente en los 12 *tiles* de la región de Norma

<i>Tile</i> ID	Coordenadas Galácticas [grados]	A_V [mag]	A_{K_s} [mag]	Candidatos Nº	Galaxias Nº
d022	(326.0489; -1.6497)	3.653	0.431	2589	151
d023	(327.5079; -1.6497)	4.355	0.514	2241	95
d024	(328.9669; -1.6497)	3.024	0.357	63	3
d060	(326.0695; -0.5575)	42.993	5.073	183	5
d061	(327.5282; -0.5576)	29.493	3.480	386	10
d062	(328.9868; -0.5576)	24.145	2.849	213	2
d098	(326.0736; 0.5346)	25.883	3.054	241	1
d099	(327.5325; 0.5346)	33.170	3.914	78	0
d100	(328.9913; 0.5346)	79.079	9.331	0	0
d136	(326.0891; 1.6268)	6.649	0.785	2587	45
d137	(327.5487; 1.6268)	11.189	1.32	346	33
d138	(328.3753; 1.6268)	38.469	4.539	67	13

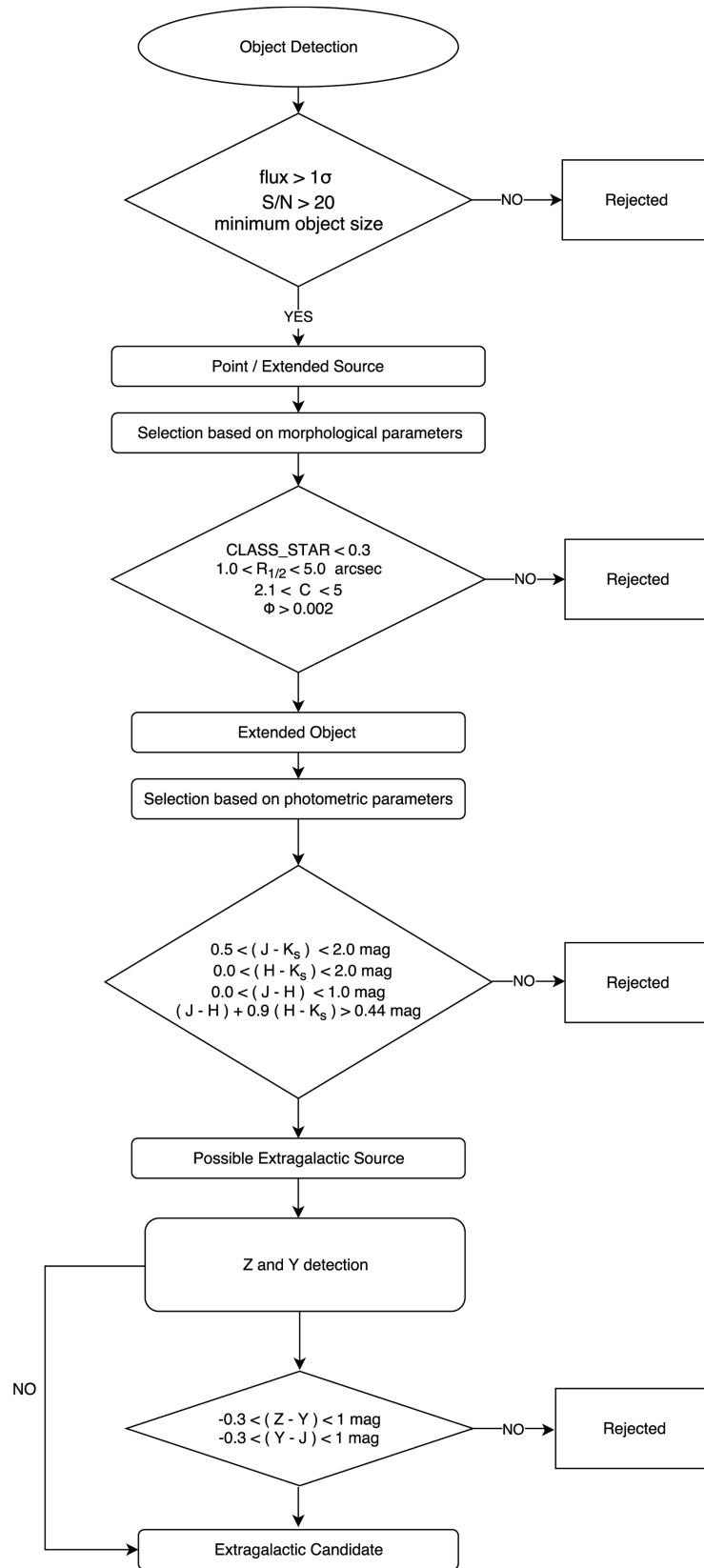


Figura 5.5: Figura extraída de Baravalle et al. (2018). Diagrama de flujo del procedimiento morfo-fotométrico.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se describen las propiedades fotométricas y morfológicas de las galaxias que han sido confirmadas tras inspección visual en los 12 *tiles* de estudio una vez aplicado el procedimiento descrito en los Capítulos 4 y 5.

6.1. El Puente de Norma

Hemos concentrado nuestra área de estudio a una región de 18 grados cuadrados que cubre desde la sección adyacente al Cúmulo de Norma (ACO3627; Abell, Corwin, & Olowin 1989) localizado en $(l, b, v) \sim (325.3^\circ, -7.2^\circ, 4871 \text{ kms}^{-1})$ (Woudt et al. 2008) bajo el plano Galáctico; hasta los Cúmulos de Centaurus-Crux pertenecientes a la Pared del Centaurus, donde Fairall et al. (1998) han reportado pequeños cúmulos y grupos de galaxias localizados en $(l, b, v) = (305^\circ, +5^\circ, 6214 \text{ kms}^{-1})$; y CIZA J1324.7-5736, un cúmulo de Rayos-X identificado en la ZoA con el relevamiento *Cluster in the Zone of Avoidance* (CIZA; Ebeling, Mullis, & Tully 2002), localizado en $(l, b, v) = (307.4^\circ, +5^\circ, 5700 \text{ kms}^{-1})$ sobre el plano Galáctico. A esta región la hemos denominado el “Puente de Norma”, por la posible naturaleza conectora de las estructuras a detectar en esta región del Universo cercano.

En la Figura 6.1, extraída del trabajo de Woudt & Kraan-Korteweg (2000), se muestra la distribución de galaxias en el espacio de *redshift* ($0 - 8000 \text{ km s}^{-1}$) centrada en el corazón del GA, previamente ubicada por Kolatt et al. (1995) en $(l, b, v) \sim (320^\circ, 0^\circ, 4000 \text{ km s}^{-1})$. En el primer panel ($0 - 2000 \text{ km s}^{-1}$), el Plano Supergaláctico recorre casi verticalmente a través del diagrama desde $(l, b) \sim (315^\circ, 30^\circ)$ hasta $(l, b) \sim (340^\circ, -25^\circ)$. En el segundo panel ($2000 \leq v \leq 4000$

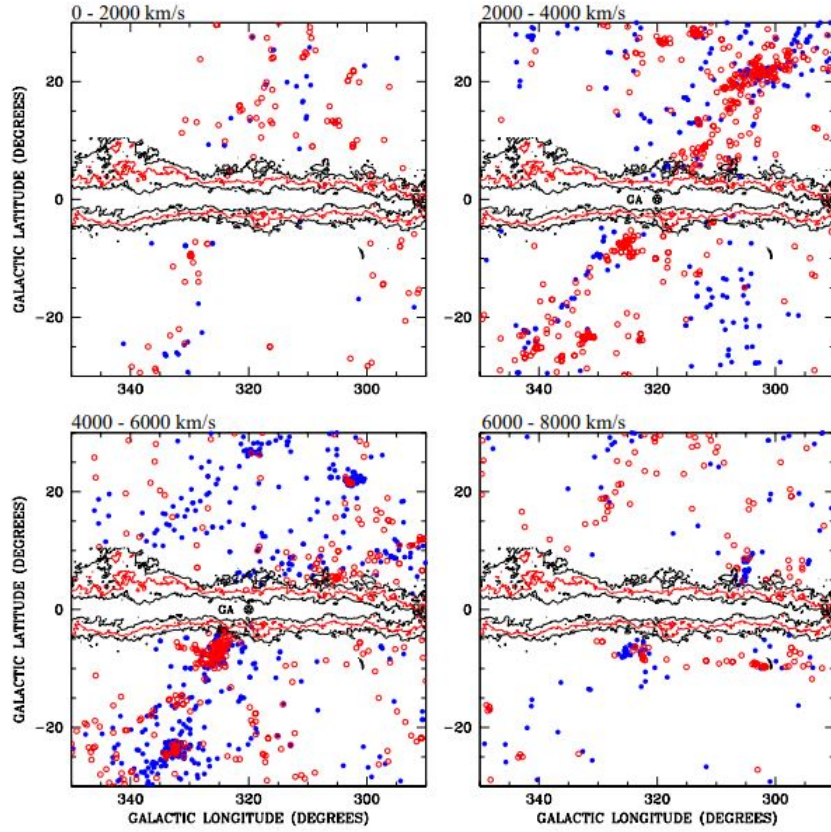


Figura 6.1: Proyecciones del cielo en coordenadas Galácticas para intervalos de *redshift* centrados en el GA. Dentro de cada panel, los *redshift* se encuentran subdivididos en intervalos de $\Delta v = 1000 \text{ km s}^{-1}$. En el primer panel (izquierda arriba), los círculos llenos marcan el intervalo de *redshift* más cercano (ej., $v \leq 1000 \text{ km s}^{-1}$), mientras que los círculos abiertos representan los intervalos más distantes ($1000 \leq v \leq 2000 \text{ km s}^{-1}$). Desde el panel superior izquierdo hasta el inferior derecho se incrementa la velocidad-distancia. Se muestran además los niveles de contorno de la extinción Galáctica en negro y rojo para $A_B = 3.0^m$ (línea gruesa), 5.0^m y 10.0^m (Schlegel et al. 1998). Esta figura fue extraída del trabajo de Woudt & Kraan-Korteweg (2000).

km s^{-1}), puede apreciarse una estructura filamental que se cree forma parte de la Pared del Centaurus (Fairall et al. 1998), y recorre desde $(l, b) \sim (340^\circ, -25^\circ)$ hasta el Cúmulo Centaurus en $(l, b) = (303^\circ, 20^\circ)$. Luego, en el tercer panel ($4000 \leq v \leq 6000 \text{ km s}^{-1}$) se puede apreciar la sobredensidad del Cúmulo de Norma como figura predominante en el cielo. En el trabajo de Woudt (1998) se muestra que esta porción de *redshift* corresponde al importante pico en el histograma de velocidades en la región del GA, y parte del pico ensanchado en la región de Crux. Es en este intervalo de *redshift* (4500 km s^{-1}) donde encontramos la distancia a la sobredensidad del GA, según los trabajos de Lynden-Bell et al. (1988) y Kolatt et al. (1995). Esta información, junto a las galaxias adyacentes al

Cúmulo Pavo II localizado en $(l, b) \sim (332^\circ, -23^\circ)$, sugieren la existencia de una estructura a gran escala que atraviesa en plano Galáctico (Woudt 1998).

Las estructuras previamente descritas para el intervalo de *redshift* entre $4000 \leq v \leq 6000 \text{ km s}^{-1}$, junto al Cúmulo Centaurus-Crux y la sobredensidad de Vela (Kraan-Korteweg & Woudt 1993) localizada en $(l, b, v) = (280^\circ, 6^\circ, 6000 \text{ km s}^{-1})$, se cree que forman parte de “Supercúmulo de Norma”; con un ancho de 3000 km s^{-1} y espesor de varios cientos de km s^{-1} (Woudt & Kraan-Korteweg 2000).

Finalmente, el Puente de Norma estaría situado entre el Supercúmulo de Norma y La Pared del Centaurus. Recordemos que la principal finalidad de la presente tesis, es detectar objetos candidatos a ser parte de estas estructuras.

En la Figura 6.2 se puede observar la distribución espacial en coordenadas Galácticas de los cúmulos adyacentes a la ZoA; CIZA 1324; Centaurus-Crux; Norma; Pavo y Centaurus.

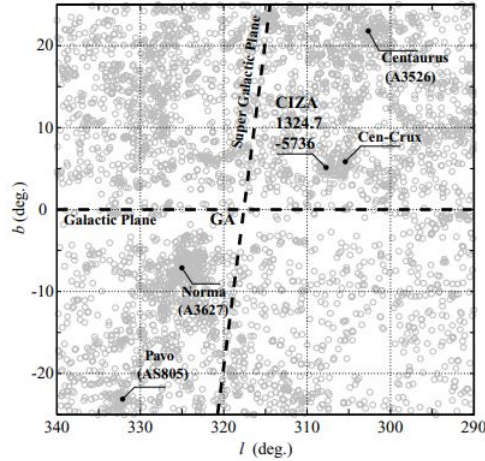


Figura 6.2: Figura extraída de Nagayama et al. (2006). Distribución espacial en coordenadas Galácticas para cúmulos adyacentes a la ZoA. Se muestra superpuesto fuentes del catálogo de 2MASSX. El plano Galáctico y Supergaláctico se encuentran ambos indicados en líneas gruesas discontinuas.

6.2. Catálogo de fuentes extragalácticas en el *Norma Bridge*

El catálogo de fuentes extragalácticas en el Puente de Norma está compuesto por objetos que, siguiendo los criterios definidos en Baravalle et al. (2018) y tras

inspección visual, son clasificados como galaxias. Debido a la naturaleza de nuestra base de datos, no nos es posible determinar la pertenencia o no de estas fuentes a alguna estructura del Universo cercano en particular, pero si nos es posible descartar a estos objetos como pertenecientes a nuestra Galaxia.

Tras aplicar el procedimiento descrito en el Capítulo 4, correcciones por extinción Galáctica y criterio de color, logramos obtener 8994 candidatos extragalácticos en los 12 *tiles* del relevamiento VVV que cubren el área de nuestro interés (Ver Tabla 5.1). Posteriormente se realizó una minuciosa inspección visual descrita en el Capítulo 5, donde se clasificó como candidatos a galaxias o galaxias confirmadas visualmente a 358 objetos.

Para su estudio y análisis, hemos generado una serie de parámetros astrométricos (coordenadas ecuatoriales y Galácticas principalmente), fotométricos (entre ellos magnitudes de apertura y PSF para las bandas J, H y K_s) y estructurales (elipticidad (e), elongación, radios para diferentes porcentajes de flujo (20 %, 50 % y 80 %) e índice de Sérsic (n)). A modo de ejemplo, en la Tabla 6.1 se muestran las primeras 10 fuentes del catálogo de fuentes extragalácticas obtenidas en este trabajo, incluyendo el identificador de objeto tomado del catálogo VVV (columna 1), coordenadas Galácticas en grados (columnas 2 y 3), magnitudes PSF corregidas por extinción Galáctica (columnas 4, 5 y 6), magnitudes para una apertura de 2 segundos de arco (columnas 7, 8 y 9), y parámetros estructurales tales como el radio que encierra el 50 % de flujo total (columna 10), concentración (columna 11), elipticidad (columna 12), y por último el índice de Sérsic (columna 13).

Tabla 6.1: Catálogo de ejemplo para las 10 primeras fuentes extragalácticas en el *Norma Bridge*

VVV ID	l [grad]	b [grad]	(J) _o [mag]	(H) _o [mag]	(K_s) _o [mag]	(J _{2''}) _o [mag]	(H _{2''}) _o [mag]	($K_{s2''}$) _o [mag]	R _{1/2} [arcsec]	C	e	n
VVV J155150.40-563020.1	325.95646	-1.92441	16.44	15.99	15.79	16.31	15.89	15.77	1.39	2.64	0.21	1.75
VVV J155000.17-561007.4	325.97002	-1.50237	16.63	16.11	15.94	16.55	16.06	15.89	1.12	4.48	0.46	7.28
VVV J155134.94-562611.4	325.97242	-1.84834	15.09	14.56	14.56	15.06	14.57	14.54	1.12	4.70	0.62	6.04
VVV J155026.31-561348.3	325.97882	-1.58816	17.21	16.42	16.04	16.96	16.26	15.83	1.03	4.07	0.22	4.24
VVV J154842.11-555531.4	325.97978	-1.19888	16.10	15.55	15.40	15.99	15.41	15.40	1.18	3.87	0.50	5.24
VVV J154905.13-555805.3	325.99522	-1.26575	15.15	14.47	14.31	14.85	14.21	14.05	1.02	4.14	0.30	7.05
VVV J155116.03-561920.9	326.01033	-1.73227	15.84	15.40	15.27	15.70	15.32	15.13	1.11	4.58	0.38	2.04
VVV J154910.62-555729.3	326.01148	-1.26592	14.92	14.31	14.24	14.80	14.27	14.19	1.09	3.18	0.54	6.17
VVV J155039.06-561148.6	326.02271	-1.58079	17.29	16.37	15.67	16.99	16.16	15.44	1.09	4.29	0.30	5.32
VVV J155948.12-560252.8	326.02366	-1.39066	17.08	16.50	16.36	16.97	16.44	16.28	1.07	4.46	0.37	5.16

En la Tabla 6.2 es posible observar la relación entre las fuentes extragalácticas y las propiedades del medio. En la columna 1 se identifica el *tile* estudiado; en la columna 2 la extinción interestelar promedio en la banda K_s para cada *tile*;

en la columna 3 el número de objetos candidatos a ser fuentes extragalácticas detectadas en ese *tile*; en la columna 4, el número de galaxias confirmadas por inspección visual en dicho *tile*, y finalmente la tasa de detección, es decir, objetos confirmados como galaxias por inspección visual en base al número de candidatos detectados por el procedimiento morfo-fotométrico. Por otro lado, en la Figura 6.3 se muestra el histograma para el número de galaxias confirmadas en función de las extinciones A_{K_s} promedio para cada *tile* descritas en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Candidatos a objetos extragalácticos, galaxias confirmadas visualmente y tasa de detección en la región del Puente de Norma

<i>Tile</i> ID	A_{K_s} [mag]	Candidatos N°	Galaxias N°	Tasa de Detección
d022	0.431	2589	151	5.83 %
d023	0.514	2241	95	4.24 %
d024	0.357	63	3	4.76 %
d060	5.073	183	5	2.73 %
d061	3.480	386	10	2.59 %
d061	2.849	213	2	0.94 %
d098	3.054	241	1	0.41 %
d099	3.914	78	0	0 %
d100	9.331	0	0	-
d136	0.785	2578	45	1.75 %
d137	1.320	346	33	9.54 %
d138	4.539	67	13	19.40 %

Dos *tiles* en particular nos hicieron analizar los resultados en detalle: En el *tile* d100, con una extinción media de $A_{K_s} = 9.331$ mag y el *tile* d024 con una extinción media de $A_{K_s} = 0.357$ mag. En el *tile* d100 no solamente no se han encontrado fuentes extragalácticas, sino que el algoritmo ha sido incapaz de detectar objetos candidatos a estudio. Sin embargo, en el *tile* d024, que presenta una extinción interestelar tan baja como $A_{K_s} < 0.5$, fue posible confirmar solo 3 objetos extragalácticos de 63 candidatos. El análisis de este fenómeno será presentado en la Sección 6.4.

Las Figuras 6.4 y 6.5 corresponden a imágenes en infrarrojo lejano obtenidas utilizando *Aladin Sky Atlas* (Bonnarel et al. 2000) para la banda W4 ($22\mu\text{m}$) de AllWISE, un programa extendido de las misiones *Wide-field Infrared Sur-*

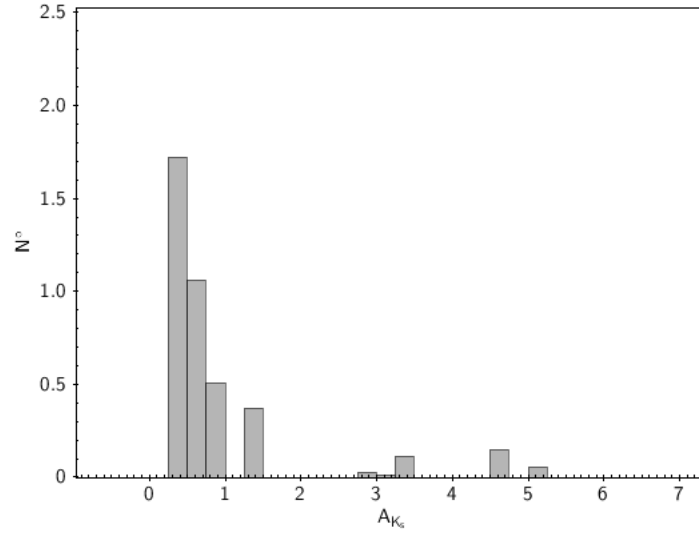


Figura 6.3: Distribución normalizada para las galaxias confirmadas en cada uno de los 12 *tiles* de estudio versus la extinción A_{K_s} , donde cada bin representa un *tile*.

vey *Explorer mission* (WISE; Wright et al. 2010) y NEOWISE (Mainzer et al. 2011), en ambas regiones descritas. En la Figura 6.4 se puede visualizar el *tile* d024 centrado en $(l, b) = (328.9669^\circ, -1.6497^\circ)$ donde las tres galaxias confirmadas visualmente se encuentran etiquetadas por los números 1 (VVV160057.76-542858.0), 2 (VVV160230.48-543124.1) y 3 (VVV160702.70-533639.1). En la Figura 6.5 se muestra la imagen en la misma banda para el *tile* d100, centrado en $(l, b) = (328.9913^\circ, 0.05346^\circ)$, donde se puede apreciar el polvo bloqueando las fuentes debido a la alta extinción interestelar. Ambas imágenes se encuentran proyectadas en un plano cartesiano en coordenadas Galácticas.

Finalmente, para contextualizar la ubicación de los candidatos a galaxias en nuestro catálogo con respecto a los estudios adyacentes al Puente de Norma, graficamos las fuentes en coordenadas Galácticas (l, b) en grados, tal como se aprecia en la Figura 6.6. En puntos azules vemos los 358 candidatos a galaxias presentes en nuestro catálogo entre $(325.33^\circ, -2.24^\circ) < (l, b) < (329.59^\circ, 2.24^\circ)$. En puntos negros vemos 187 galaxias descritas en Said et al. (2016a); y en círculos rojos, las 70 galaxias más brillantes pertenecientes al trabajo de Said et al. (2016a) con contraparte en 2MASX. Para puntos negros y rojos la muestra está delimitada entre $(-300^\circ, -10^\circ) < (l, b) < (335^\circ, 10^\circ)$. Luego, los puntos fucsias representan las galaxias del cúmulo ClZA 1324, un cúmulo en Rayos-X estudiado fotométricamente en infrarrojo cercano en Nagayama et al. (2006) con 111 fuentes extragalácticas.

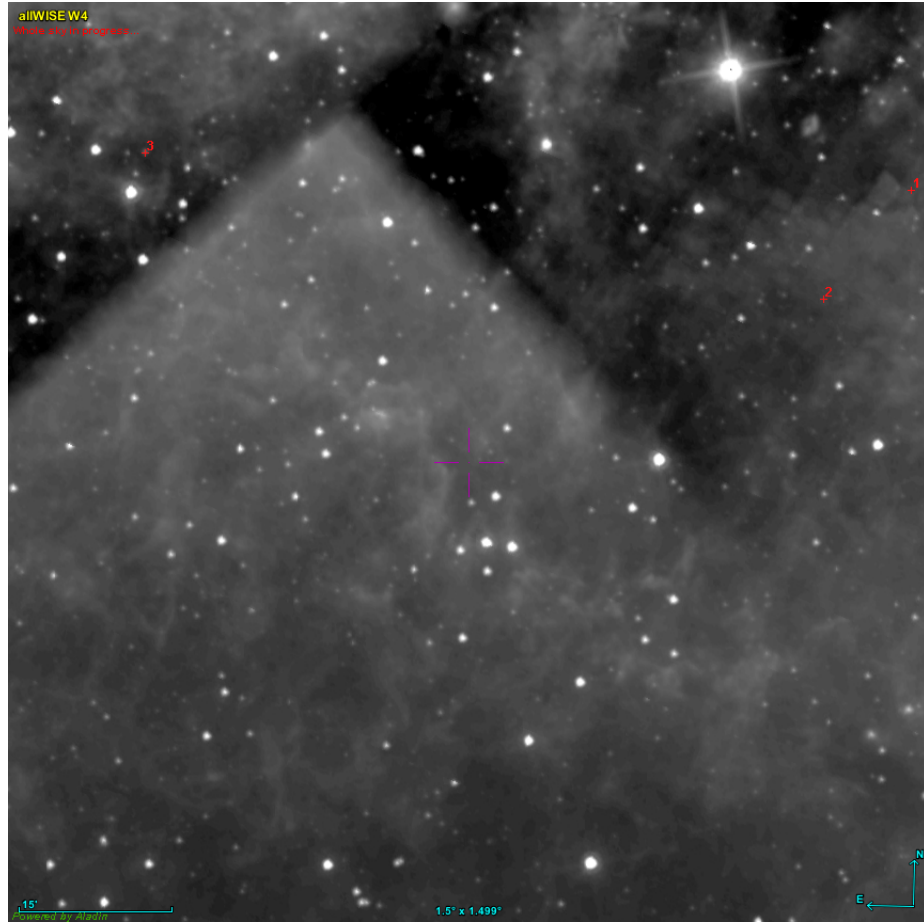


Figura 6.4: Imagen en infrarrojo lejano del programa AllWISE (1.5×1.5 grados cuadrados) para el *tile* d024 utilizando la banda W4 de $22 \mu\text{m}$. La imagen está centrada en $(l, b) = (328.9669^\circ, -1.6497^\circ)$, y las tres galaxias confirmadas visualmente en nuestro catálogo para este *tile* se encuentran etiquetadas por los números 1, 2 y 3 en rojo. La imagen se encuentra proyectada en un plano cartesiano en coordenadas Galácticas.

Por último, los puntos verdes corresponden a 390 galaxias analizadas por Skelton et al. (2009) como parte de un estudio fotométrico en infrarrojo cercano del cúmulo de Norma. Cabe destacar que las 358 galaxias confirmadas visualmente en nuestro catálogo no poseen contraparte en los estudios mencionados anteriormente, y se mencionan estos trabajos para ejemplificar estudios fotométricos en infrarrojo cercano llevados a cabo en el área adyacente al Puente de Norma.

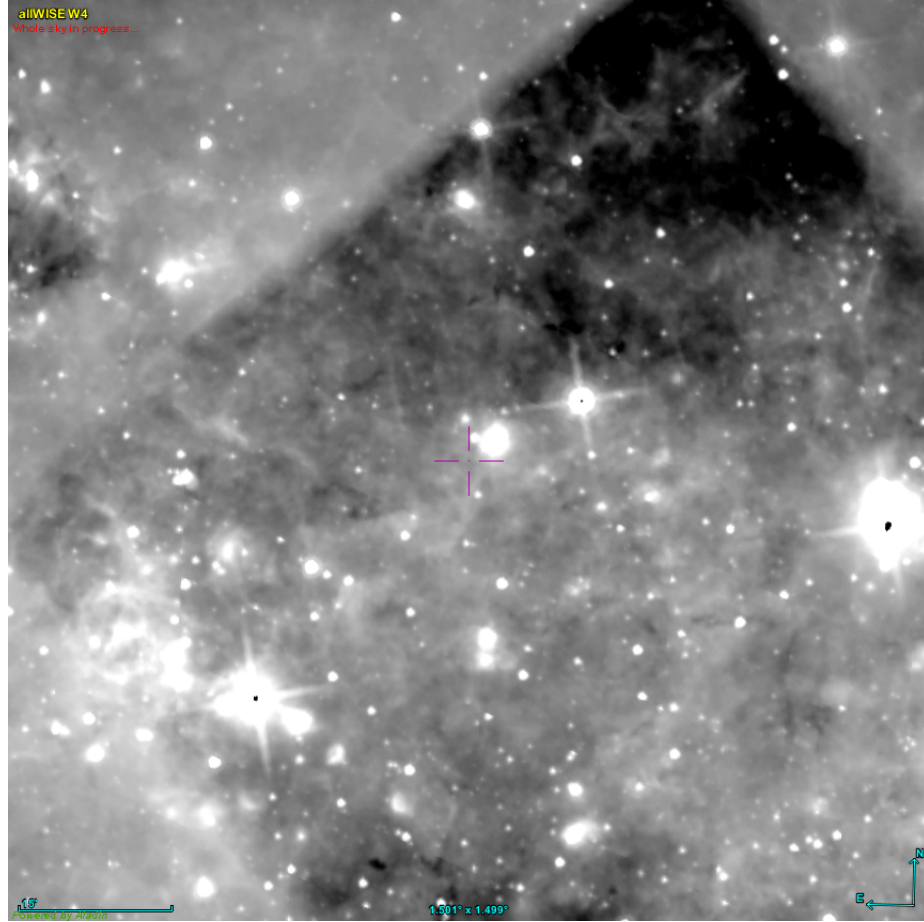


Figura 6.5: Imagen en infrarrojo lejano del programa AllWISE (1.5×1.5 grados cuadrados) para el *tile* d100 utilizando la banda W4 de $22 \mu\text{m}$. La imagen se encuentra centrada en $(l, b) = (328.9913^\circ, 0.05346^\circ)$, y está proyectada en un plano cartesiano en coordenadas Galácticas.

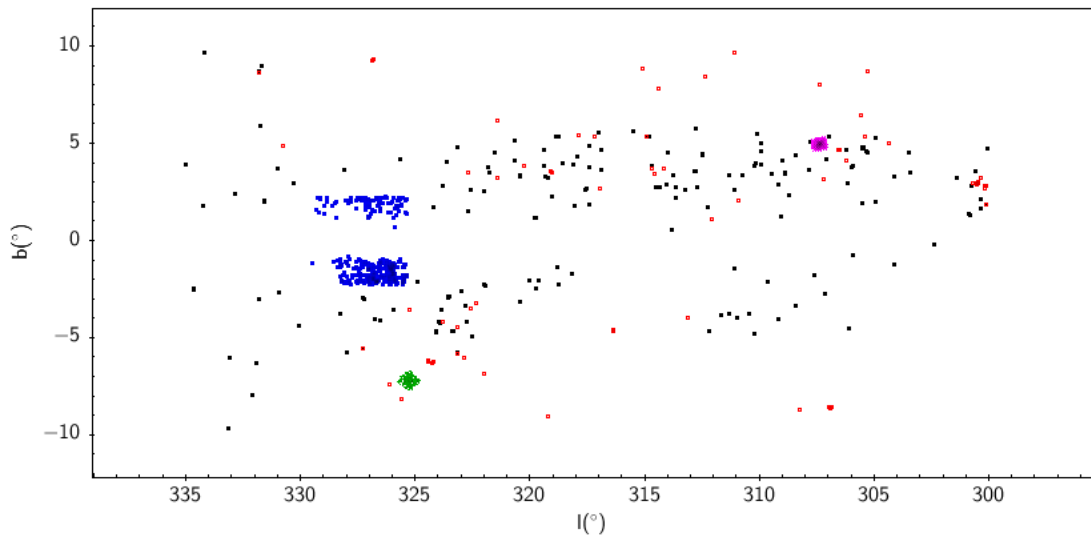


Figura 6.6: Distribución espacial en coordenadas Galácticas para cúmulos y galaxias adyacentes al Supercúmulo de Norma. En puntos azules se muestran los 358 candidatos a galaxias de nuestro catálogo; en puntos negros 187 galaxias obtenidas del catálogo de Said et al. (2016a), y en círculos rojos, 70 galaxias brillantes del catálogo de Said et al. (2016a) con contraparte en 2MASX, ambas muestras restringidas entre $300^{\circ} < l < 335^{\circ}$ y $-10^{\circ} < b < 10^{\circ}$. En puntos fucsias se representan las 111 galaxias del cúmulo CIZA 1324 de Nagayama et al. (2006) y finalmente en puntos verdes, 390 galaxias pertenecientes al Cúmulo de Norma (Skelton et al. 2009).

6.3. Caracterización de fuentes extragalácticas en la región del Puente de Norma

Una de las principales complejidades de este trabajo, radica en detectar y estudiar objetos considerando el tremendo efecto de enrojecimiento que tiene el polvo de nuestra Galaxia en la radiación proveniente de las galaxias de fondo. Entendiendo que la emisión proveniente de las galaxias ya está afectada por distintos efectos cosmológicos, esta finalmente es bloqueada o perturbada por el medio interestelar en el disco de la Vía Láctea.

No considerar que las propiedades observadas de estas fuentes tienen una relación con el medio interestelar de la VL en la línea de visión, gatillarían un sesgo en nuestros resultados de análisis (Riad et al. 2010). Podríamos estar sobreestimando el número de galaxias elípticas al considerar como fuentes extragalácticas solo aquellas esferoidales, o subestimando el conteo de galaxias en espiral, con los consecuentes efectos en la posibilidad de trazar filamentos de la LSS. Esto según la sensibilidad de ciertos relevamientos para la detección de galaxias tempranas, como es el caso de relevamientos en infrarrojo cercano (Schröder et al. 1999; Jarrett et al. 2000a,b), o tardías, como sucede con relevamientos HI (Henning et al. 1999, 2010; McIntyre et al. 2015).

Para esto, realizaremos un análisis de los objetos clasificados como fuentes extragalácticas, utilizando los parámetros morfo-fotométricos obtenidos en la Sección 4.2.1.

Los parámetros morfológicos: $R_{1/2}$ obtenido como el segundo elemento del vector FLUX_RADIUS, definido como el radio que contiene el 50 % del flujo total de la fuente en segundos de arco; C (índice de concentración), calculado de la razón entre el tercer y primer elemento de FLUX_RADIUS, el radio que encierra el 80 % y 20 % del flujo total Petrosiano respectivamente; SPHEROID_SERSICN, el índice de Sérsic, que describe el perfil de luz de la galaxia y sus componentes; y ELLIPTICITY, la elipticidad de cada fuente. Y los parámetros fotométricos: MAG_PSF_J_CORR, MAG_PSF_H_CORR, MAG_PSF_KS_CORR, las magnitudes PSF para cada banda, y MAG_APER_J_CORR, MAG_APER_H_CORR, MAG_APER_KS_CORR, las magnitudes de apertura circular de 2 segundos de ar-

co de diámetro. Todas las magnitudes han sido corregidas por extinción Galáctica.

6.3.1. Análisis fotométrico

La principal finalidad del análisis fotométrico es poder clasificar nuestras fuentes como posibles integrantes en rangos de *redshift*, según la Figura 6.1.

En la Figura 6.7 se muestran los diagramas color-color (izquierda) y color-magnitud (derecha) en infrarrojo cercano para el catálogo de 358 galaxias confirmadas por inspección visual (círculos rojos) versus los 8994 candidatos extragalácticos (puntos negros) obtenidos a través del procedimiento descrito en Baravalle et al. (2018). Los diagramas fueron graficados utilizando los parámetros fotométricos: MAG_PSF_J_CORR, MAG_PSF_H_CORR y MAG_PSF_KS_CORR. Estas magnitudes fueron corregidas por extinción Galáctica. En el primer panel podemos ver que en general, para las fuentes confirmadas como galaxias se ajustan a los rangos de color entre 0 y 1 para $(J-H)_0$ y $(H-K_s)_0$, sin embargo tenemos tres casos que se distribuyen lejos de este espacio confinado en color. Cada uno de estos objetos debe ser estudiado en detalle, y sirven como precedente para establecer que no todas las galaxias cumplen los mismos criterios de color y no se ajustan de igual forma en el diagrama. En el panel de la derecha, las galaxias se ubican entre el rango de magnitud $12.69 < (K_s)_0 < 16.58$; mientras que para $(J-K_s)_0$ se concentran entre los valores 0 y 2.

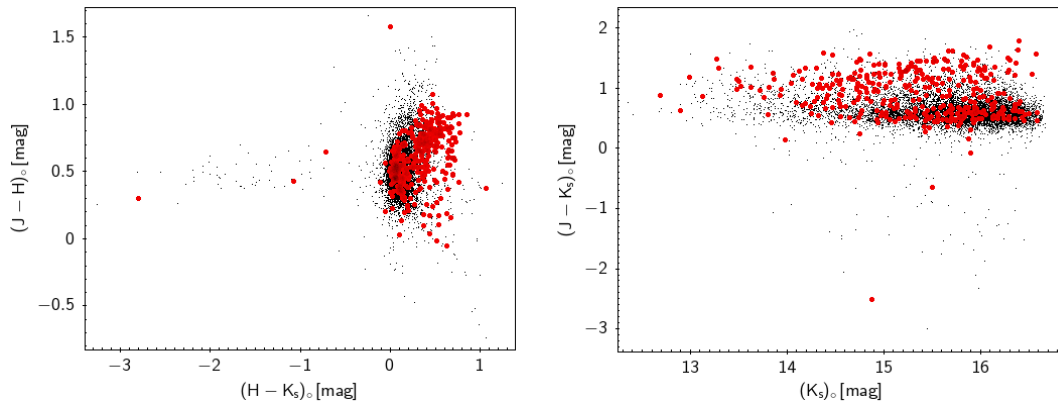


Figura 6.7: Izquierda: Diagramas color-color y color-magnitud en infrarrojo cercano de las 358 galaxias confirmadas tras inspección visual (círculos en rojo) versus los 8994 candidatos extragalácticos (puntos en negro) obtenidos al aplicar el procedimiento morfo-fotométrico descrito en Baravalle et al. (2018).

Graficamos además las distribuciones de los parámetros fotométricos para nuestro catálogo (306 candidatos a galaxias sin detección en 2MASS PSC) y las comparamos con los valores obtenidos de las 52 fuentes que tienen correlación en el catálogo 2MASS PSC (Ver Figura 6.8). Para el primer panel (izquierda superior) existe un pico cercano en $(K_s)_o \sim 16$ mag en nuestra muestra, mientras que para los objetos con *crossmatch* en 2MASS PSC tenemos uno cercano alrededor de 14.5 mag, esto implica que la mayoría de los objetos extragalácticos en 2MASS PSC son al menos una magnitud más brillantes. Para ejemplificar, en el trabajo de Baravalle et al. (2018) se reportan fuentes extragalácticas con magnitudes en la banda K_s tan débiles como $K_s \sim 17.5$ mag, mientras que en el trabajo de Saito et al. (2010) y Saito et al. (2013) señalan que el relevamiento VVV es al menos tres magnitudes más profundo que previos relevamientos en NIR realizados en las mismas regiones de la VL (e.g. Saito et al. 2012), esto debido a que posee mayor resolución angular en el infrarrojo cercano. Así, utilizando el relevamiento VVV, podemos ir más profundo en el Universo y trazar estructuras que de otra forma no podríamos resolver.

Por otro lado, podemos extraer de la Figura 6.8 que los colores alcanzados por las 306 galaxias de nuestra muestra llegan a colores aún más rojos que las fuentes con correlación en 2MASS PSC. Esto se hace notorio en los colores $(H-K_s)_o$ y $(J-K_s)_o$, donde la muestra de 306 galaxias llega hasta $(J-K_s)_o \sim 1.7$ mag, mientras que la muestra de 2MASS alcanza $(J-K_s)_o \sim 1.4$.

Calculamos los valores medios para los parámetros fotométricos y morfológicos del catálogo general (358 galaxias) tal como puede verse en la Tabla 6.3, mientras que las incertezas asociadas a cada valor se calcularon a través de la fórmula de desviación estándar para la media. A través de este trabajo se usará “error” e incerteza de los valores medios de manera indistinta.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.1)$$

$$\sigma_\mu = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (6.2)$$

Con σ la desviación estándar de mis datos, N el número total de datos, $\bar{x}$ el valor medio, y σ_μ la desviación estándar asociada a la media.

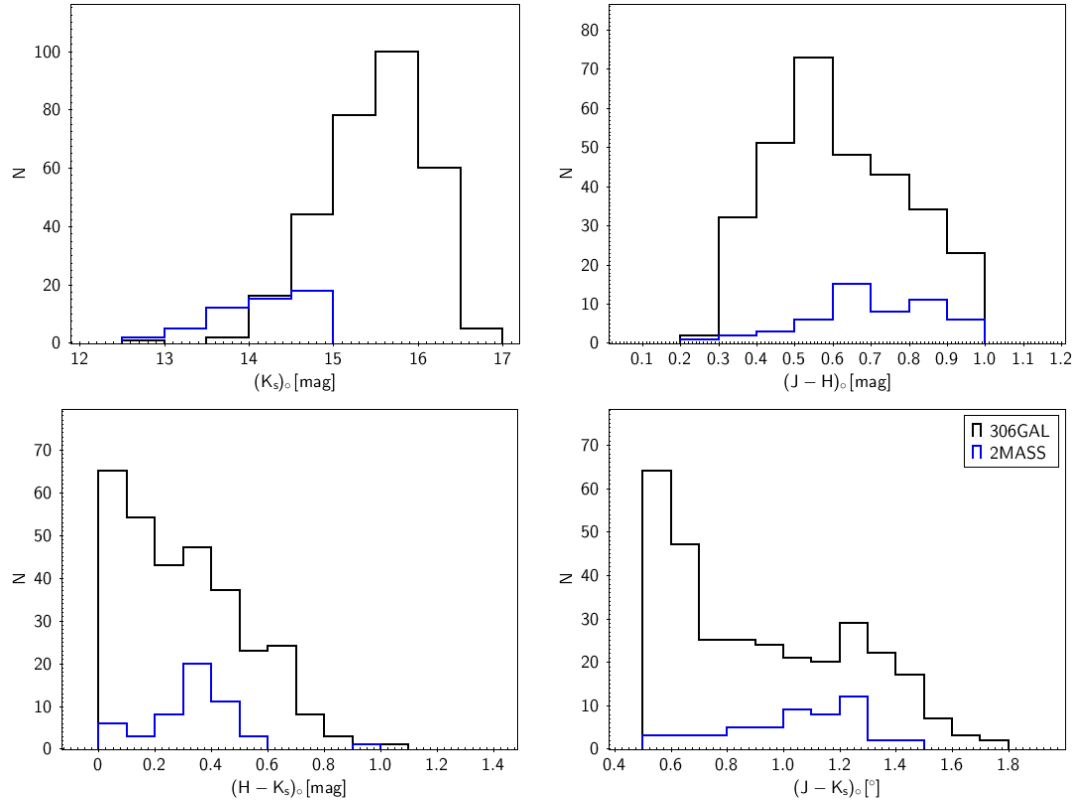


Figura 6.8: Distribuciones de los parámetros fotométricos corregidos por extinción Galáctica de las galaxias en los 12 *tiles* del “Puente de Norma”. En los paneles superiores se observa el histograma para la magnitud $(K_s)_0$ (izquierda) y el histograma de color $(J-H)_0$ (derecho); mientras que en los paneles inferiores vemos a la izquierda y derecha los colores NIR $(H-K_s)_0$ y $(J-K_s)_0$, respectivamente. La línea negra representa todas las galaxias confirmadas visualmente sin detección en 2MASS, mientras que la línea azul representa solo las galaxias confirmadas con correlación en 2MASS PSC. Todas las magnitudes y colores han sido corregidos por extinción Galáctica.

6.3.2. Análisis morfológico

Tomamos los parámetros morfológicos $R_{1/2}$, C , SPHEROID_SERSICN, y ELLIPTICITY descritos en la Sección 4.2.1, y graficamos los histogramas de distribución para la muestra completa de 358 galaxias, tal como puede verse en la Figura 6.9. Esto, junto a lo visto en la Tabla 6.3, nos indica que las galaxias que tenemos en nuestro catálogo presentan un índice de concentración C en el intervalo (3,5), con valor medio de $C = 4.074 \pm 0.057$. El índice de concentración es conocido por correlacionarse bastante bien con el tipo morfológico de galaxias (Morgan 1958; Doi et al. 1993; Abraham et al. 1994; Shimasaku et al. 2001; Nakamura et al. 2003; Park & Choi 2005). En el trabajo de Conselice, Bershadsky, & Jangren (2000)

Tabla 6.3: Valores medios para magnitudes, colores y parámetros morfológicos del catálogo general junto al error obtenido a través de la desviación estándar para la media.

Parámetro	Valor Medio $\pm$ Error
(J) _o [mag]	16.20 ± 0.04
(H) _o [mag]	15.60 ± 0.04
(K _s) _o [mag]	15.31 ± 0.04
(J-H) _o [mag]	0.630 ± 0.010
(H-K _s) _o [mag]	0.312 ± 0.011
(J-K _s) _o [mag]	0.941 ± 0.017
R _{1/2} [arcsec]	1.222 ± 0.013
C	4.074 ± 0.057
<i>e</i>	0.370 ± 0.008
<i>n</i>	3.790 ± 0.095

muestran cómo el índice de concentración con valores $C > 3.5$ se ajusta bastante bien para galaxias elípticas o de tipo temprano, mientras que para valores $C < 3.5$ se correlaciona principalmente con galaxias de tipo tardío o con discos prominentes. Los resultados sugieren que los objetos extragalácticos de nuestro catálogo podrían tratarse de galaxias de tipo temprano.

Por otro lado, el índice de Sérsic (n), que describe el perfil de luz de las galaxias y sus componentes, posee una dependencia con la densidad de galaxias según lo estudiado por Hiemer et al. (2014). Para sistemas con ambientes de baja densidad se tiene $0.4 < n < 1.6$, mientras que para sistemas de alta densidad se tiene $2.5 < n < 7.0$. En el caso de nuestra muestra, se encuentra en el intervalo (1,7), con valor medio cercano a 4, lo cual ajusta un perfil de Vaucouleurs, aproximación típica para galaxias elípticas. Esto sugiere que las galaxias confirmadas en nuestro catálogo son en su mayoría de tipo temprano, corroborando lo que se había concluido con el índice de Concentración. Luego tenemos las elipticidades que se encuentran en el intervalo (0.1,0.6), con un valor medio de $e = 0.370 \pm 0.008$, y el R_{1/2} en el intervalo (1.0,1.5) y valor medio de $R_{1/2} = 1.222 \pm 0.013$ segundos de arco, presentando un pico en la distribución de 1.2 segundos de arco bastante prominente, lo cuál implicaría que nuestros objetos son más bien circulares y pequeños.

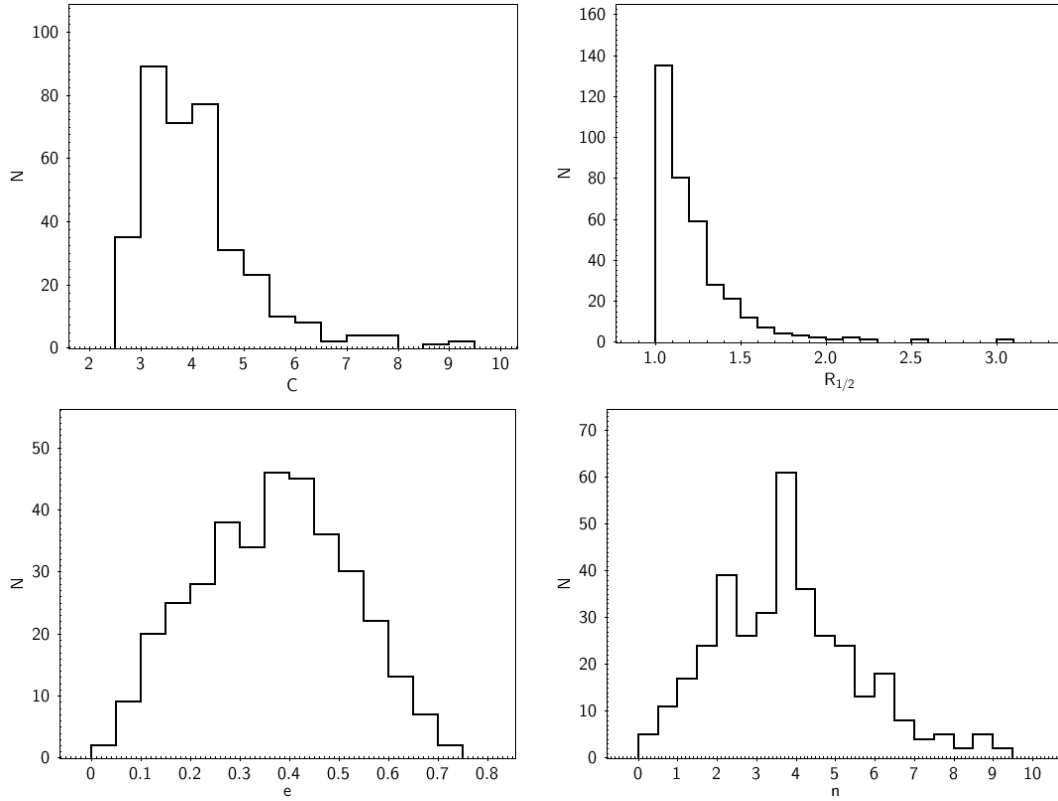


Figura 6.9: Distribuciones de los parámetros morfológicos de las galaxias en los 12 *tiles* del “Norma Bridge”. En el panel superiores se observa el histograma para el índice de Concentración (C) (izquierda) y $R_{1/2}$, el radio que contiene el 50 % del flujo total de la fuente (derecha); mientras que en los paneles inferiores Elipticidad (e) a izquierda y el índice de Sérsic (n) a la derecha. La línea continua negra representa las 358 galaxias confirmadas visualmente de nuestro catálogo.

6.4. Trazando estructuras

Ya que no tenemos distancias ni velocidades peculiares de los candidatos a galaxias, caracterizamos la muestra usando la distribución espacial de los objetos en el Puente de Norma. En la Figura 6.10 observamos los histogramas para la distribuciones espaciales en coordenadas Galácticas, donde cada bin representa 0.5 grados en el gráfico. Cabe destacar que se utilizaron dos muestras para realizar estos histogramas: las 306 galaxias confirmadas visualmente que no tienen detección en 2MASS PSC (línea negra), y las 52 galaxias de nuestro catálogo que comparten correlación con 2MASS PSC. En el panel izquierdo se puede distinguir que hay mayor detección de fuentes en los *tiles* inferiores del área de estudio, mientras que al acercarse al plano Galáctico es prácticamente nula, esto según la Figura 6.3 se encuentra relacionado con la alta extinción interestelar en el área. Bajo

$b = 0^\circ$ nos encontramos con 266 galaxias confirmadas visualmente que corresponden aproximadamente a un 74 % del total de detecciones. Luego en el panel a la derecha vemos el histograma de distribución en longitud Galáctica, donde hay un aumento importante de detección en $325.5^\circ < l < 327^\circ$, lo cuál corresponde a los *tiles* d022 y d023.

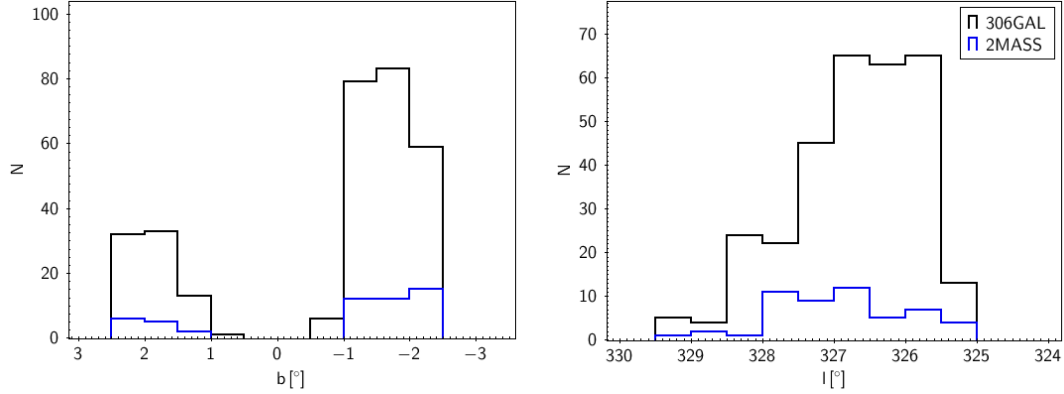


Figura 6.10: Distribuciones para la distribución espacial en coordenadas Galácticas en grados. En el panel izquierdo se ve la distribución para la latitud Galáctica, mientras que en el derecho para la longitud Galáctica en grados. Cada bin representa 0.5 grados en el gráfico. Las galaxias confirmadas visualmente sin detección en 2MASS se ven representadas en la línea negra, mientras que aquellas solo con correlación en 2MASS PSC están representadas por la línea azul.

Según lo visto en la Sección 6.2, analizamos la correlación lineal del número de detecciones para candidatos extragalácticos y galaxias confirmadas visualmente, con respecto a la extinción en la banda K_s a través del Método estadístico de Pearson. Para ello, tomamos los valores de la Tabla 5.1, y se calculó el Coeficiente de Correlación de Pearson para cada una de estas variables. Los resultados se resumen en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Valores para el índice de correlación utilizando el Método estadístico de Pearson para candidatos extragalácticos obtenidos por el algoritmo, galaxias confirmadas visualmente y extinción promedio en el centro de cada tile A_{K_s} .

	Candidatos	Galaxias	A_{K_s}
Candidatos	1.000000	0.861868	-0.586899
Galaxias	0.861868	1.000000	-0.545219
A_{K_s}	-0.586899	-0.545219	1.000000

El coeficiente de Pearson se utiliza para comparar variables continuas y cuantitativas. Si el valor de este coeficiente se acerca a 1, entonces existe una correlación

lineal, de otro modo, si es cercano al valor 0, no existe tal relación. En nuestro caso podemos verificar a través de la Tabla 6.4 que no existe una correlación lineal entre el número de galaxias confirmadas y la extinción. Se muestran los resultados graficados en una matriz de correlación (Ver Figura 6.11), codificado según los valores del coeficiente de Pearson.

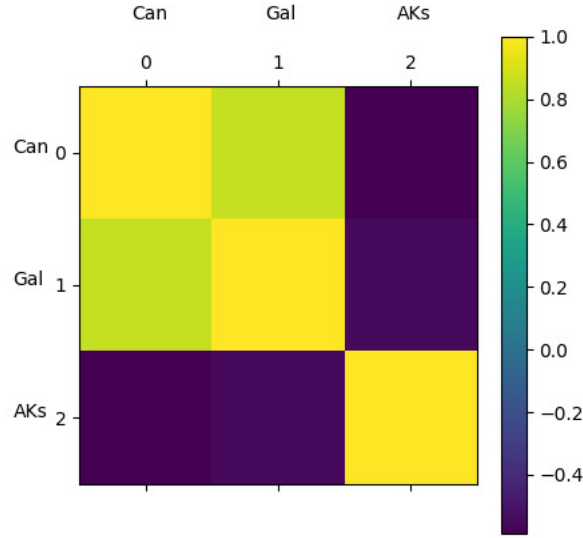


Figura 6.11: Matriz de correlación de valores del Coeficiente de Pearson, codificados según valores obtenidos en la Tabla 6.4 como indica la barra de colores. En la primera, segunda y tercera columna vemos el coeficiente de Pearson para el número de candidatos extragalácticos seleccionados por el algoritmo, el número de galaxias confirmadas tras inspección visual y la extinción A_{K_s} , respectivamente.

La tasa de detecciones de fuentes extragalácticas decrece drásticamente para $A_{K_s} > 3.0$ mag (Ver Figura 6.12), sin embargo es importante fijarnos en el régimen de $A_{K_s} < 3.0$ mag, donde hay una importante dispersión de los datos, como es el caso del *tile* d024, que a pesar de tener una extinción tan baja como $A_{K_s} = 0.357$, se pudo confirmar solo 3 galaxias. Este resultado sugiere que la baja extinción en ciertos *tiles*, no implica una alta tasa de detección de galaxias. En principio, este resultado sustenta nuestra propuesta respecto a la capacidad del relevamiento VVV para detectar la Estructura a Gran Escala del Universo tras la Vía Láctea, pues nuestros resultados nos muestran que no solo es posible trazar aquellas regiones en la cual las galaxias dominan grandes regiones del cielo

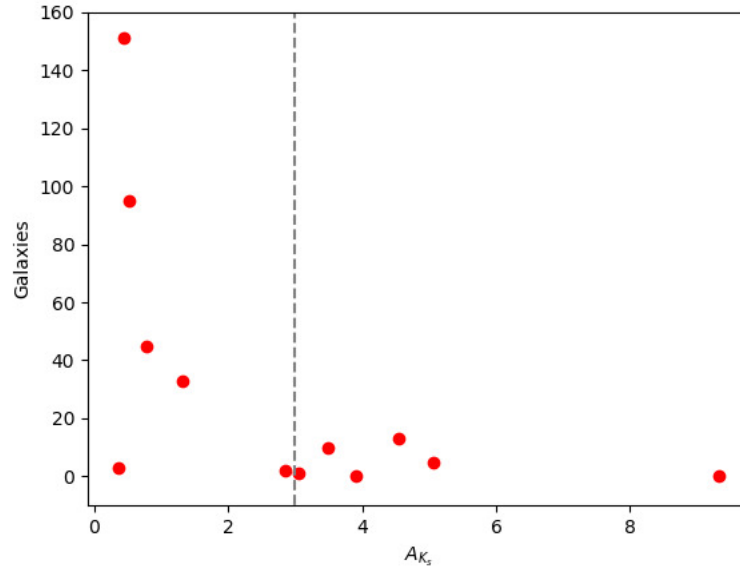


Figura 6.12: Número de galaxias confirmadas visualmente con respecto a la extinción en la banda K_s . Cada punto representa el número de detecciones en un *tile*, y la línea segmentada corresponde a un corte en extinción $A_{K_s} = 3$ mag.

(filamentos), sino que además, podemos estadísticamente detectar regiones en la cual existe completa ausencia de fuentes extragalácticas.

Respecto a cómo es la distribución de objetos en el Puente de Norma, se analizaron concentraciones de galaxias confirmadas visualmente en los 12 *tiles* de estudio. Basamos nuestra metodología en una técnica de análisis de *Clustering* y para ello establecimos tres criterios:

1. Nos centramos en las galaxias más brillantes del Puente de Norma, $K_{so} < 14.3$ mag y trazamos anillos para radios de 5 y 10 arcominutos.
2. Si en un anillo de 10 minutos de arco de radio encontramos menos de 5 galaxias de nuestro catálogo, entonces el candidato no cumple el requisito y se vuelve al paso 1)
3. Si los anillos de dos o más candidatos se intersectan, el radio de búsqueda aumenta a la distancia entre las dos galaxias más brillantes de la muestra y se analizan los candidatos como solo uno.

Para trazar estructuras en el Puente de Norma llevamos a cabo el *test* de Dressler-Shectman (Dressler & Shectman 1988) descrito en el trabajo de Nilo Castellón et al. (2014) en los 12 *tiles* de estudio.

Empíricamente la relación densidad-radio en un cúmulo de galaxias cumple una ley de potencia. Sin embargo, no todas las galaxias de un cúmulo lo cumplen, sino solo las galaxias que se encuentran en la “Secuencia Roja de Cúmulos” (conocido en inglés como *Red Cluster Sequence*, RCS; Yee, Gladders, & López-Cruz 1999). Las galaxias elípticas en cúmulos pueden ser caracterizadas en el espacio de color-magnitud denominado RCS. En nuestro caso, como vimos en la Figura 6.8, en el diagrama color-magnitud $(J-K_s)_0$ versus $(K_s)_0$ las galaxias permanecen en general confinadas al espacio de color a través de un amplio rango de magnitudes en K_s . Esto se asemeja bastante al “apilamiento” de cúmulos en la RS presentado en el trabajo de O’Mill et al. (2019). Esto nos indica que las galaxias de nuestro catálogo pertenecen a este apilamiento de RS. Finalmente, sin importar el *redshift* las galaxias en la RCS estas siempre cumplen una ley de potencia.

En el trabajo de Nilo Castellón et al. (2014) se muestra que las galaxias en cúmulos siguen esta ley de potencia hasta un determinado radio en megapársec, y luego la curva cae en picada y se vuelve plana (ver Figura 6.13). Esto significa que más allá de este radio confinado ya no se encuentran más galaxias.

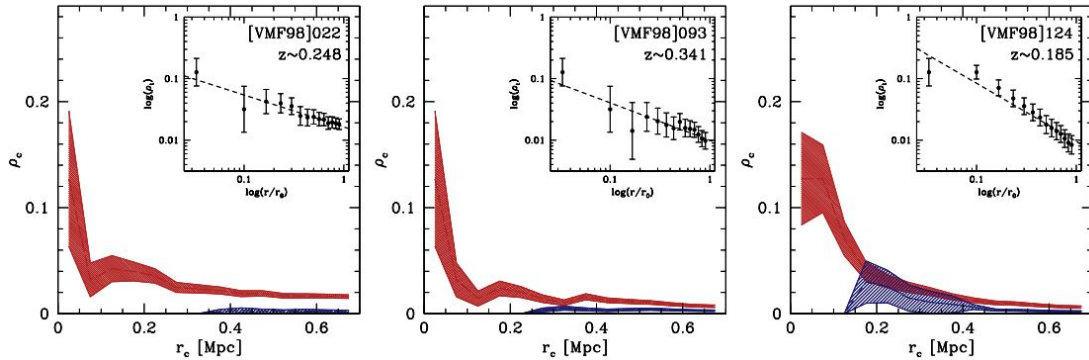


Figura 6.13: Figura extraída de Nilo Castellón et al. (2014). Se muestra en la imagen los Perfiles de Densidad (*Galaxy number Density Profiles*) para cúmulos de galaxias a bajo *redshift* para dos muestras: RCS (en rojo) y Blue (en azul). Se muestran los perfiles de densidad numérica radial total de las galaxias en los paneles pequeños.

Dado que en este trabajo no se cuenta con espectros y no se sabe en qué *redshift* se encuentran las galaxias se utilizaron diámetros fijos en el espacio (Dressler & Shectman 1988) y se fijaron dos anillos de radios 5 y 10 minutos de arco para buscar galaxias. Este procedimiento se utilizó además en Baravalle et al. (2019) donde fue posible encontrar un cúmulo en el *tile* d015.

Luego de realizar el análisis de *clustering* a los 12 *tiles* de interés, se encontraron siete candidatos concentrados en el *tile* d022. Esto puede deberse a que el *tile* d022 cuenta con la mayor tasa de detección de galaxias y además posee una extinción promedio de $A_{K_s} = 0.431$. Por otro lado, no se cumplió el segundo criterio para las dos galaxias con contraparte en Rayos-X en d136 ($A_{K_s} = 0.785$ mag) y d137 ($A_{K_s} = 1.320$ mag), ya que en ambos *tiles* existe una baja tasa de confirmación de candidatos extragalácticos a ser considerados galaxias, lo cual dificulta la posibilidad de encontrar más de dos o tres miembros en un radio de 10 minutos de arco.

En la Figura 6.14 puede apreciarse la distribución espacial en coordenadas Galácticas de los candidatos trazadores para en el *tile* d022. En puntos amarillos se tiene la primera sobredensidad de galaxias (1) centrado en VVV J154805.45-564854.3 ($K_{so} = 13.50$ mag) con 5 galaxias concentradas en dos anillos de 5 y 10 minutos de arco de radio. En puntos celestes se representa el segundo candidato (2) centrado en VVV J155644.84-561223.2 ($K_{so} = 14.26$ mag) con 9 galaxias en un anillo de 5 minutos de arco de radio y 16 galaxias en un anillo de 10 minutos de arco de radio. En puntos fucsias se representa el tercer candidato (3) centrado en VVV J155014.31-555828.3 ($K_{so} = 13.48$ mag) con 6 galaxias en un anillo de 5 minutos de arco de radio y 16 galaxias en un anillo de 10 minutos de arco de radio. En puntos cafés se representa el cuarto candidato (4) centrado en VVV J155032.18-565542.6 ($K_{so} = 13.80$ mag) con 5 galaxias en un anillo de 5 minutos de arco de radio y 8 galaxias en un anillo de 10 minutos de arco de radio. En puntos verdes se representa el quinto candidato (5) centrado en VVV J154649.04-562110.7 ($K_{so} = 13.53$ mag) con 5 galaxias en dos anillo de 5 y 10 minutos de arco de radio. En puntos morados se representa el sexto candidato (6) centrado en VVV J155126.45-563539.6 ($K_{so} = 14.19$ mag) con 4 galaxias en un anillo de 5 minutos de arco de radio y 6 galaxias en un anillo de 10 minutos de arco de diámetro. Finalmente, los triángulos azules representan el último candidato (7) centrado

en VVV J154949.30-560958.5 ($K_{s0} = 13.62$ mag) con 3 galaxias en un anillo de 5 minutos de arco de radio y 17 galaxias en un anillo de 10 minutos de arco de radio.

Es posible distinguir que el criterio 3) se cumple para los candidatos (3) y (7), ya que ambos anillos de 10 minutos de arco se intersectan y comparten miembros, de modo que se expande el radio de búsqueda a 18 minutos de arco para analizar el caso como solo un candidato. En la Figura 6.15 puede apreciarse la distribución espacial de la unión de ambos candidatos.

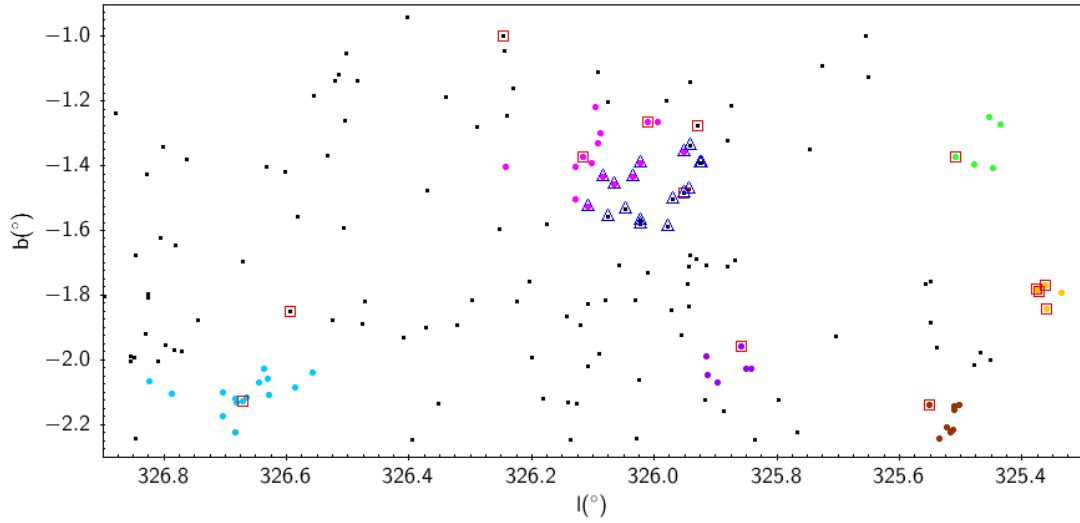


Figura 6.14: Distribución espacial en coordenadas Galácticas de los candidatos trazadores de estructura en el *tile* d022. En puntos se tienen todos los objetos extragalácticos confirmados pertenecientes al *tile*, mientras que en cuadrados tenemos las galaxias más brillantes a partir de las cuales se fijaron anillos de 5 y 10 minutos de arco ($K_{s0} < 14.3$ mag). En puntos amarillos se representa el primer candidato (1), en puntos celeste el segundo candidato (2), en puntos fucsias el tercer candidato (3), en puntos cafés el cuarto candidato (4), en puntos verdes el quinto candidato (5), en puntos morados el sexto candidato (6) y finalmente, en triángulos azules el séptimo candidato (7), compartiendo miembros con el candidato (3).

En las Figuras 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 y 6.22 se tienen los diagramas color-magnitud para los siete candidatos a trazadores, mientras que en la Figura 6.23 se tiene el diagrama color-magnitud para la unión de los candidatos (3) y (7) con un radio de búsqueda de 18 minutos de arco.

A simple vista podemos descartar varios candidatos que no cumplen con las características esenciales de la RCS. Las galaxias más brillantes de la muestra deben ser además aquellas que presenten los colores más enrojecidos en el parámetro $(J-K_s)_0$, mientras que el resto de las galaxias deben alinearse a magnitudes más débiles y con una estrecha relación en color. Además, la pendiente de la RS debe

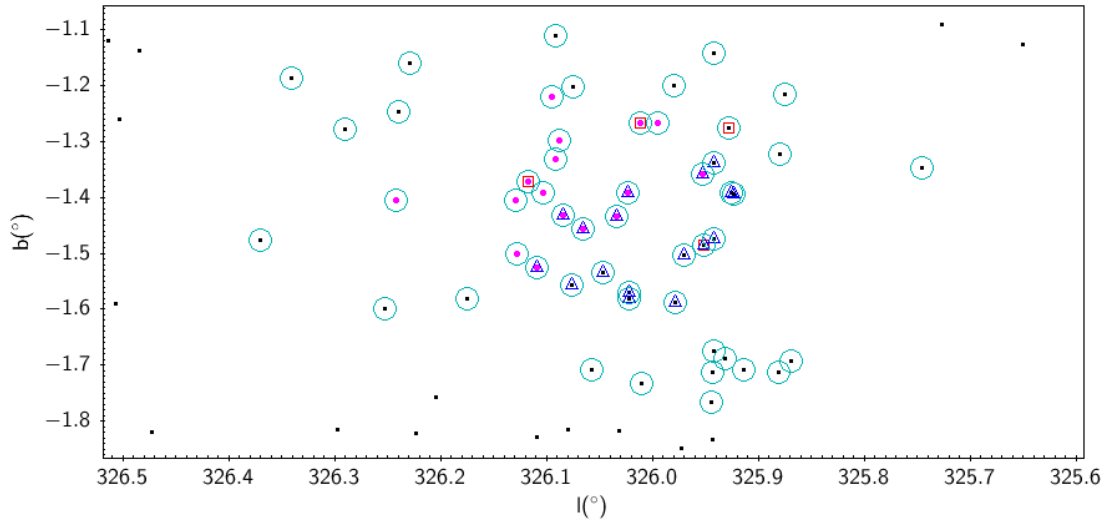


Figura 6.15: Distribución espacial en coordenadas Galácticas para los candidatos (3) y (7) con un nuevo radio de búsqueda de 18 minutos de arco. Los puntos fucsias representan el candidato (3), mientras que los triángulos azules el candidato (7). Aquellas galaxias que comparten pertenencia a ambos candidatos se ven representadas con puntos fucsias y triángulos azules superpuestos. Los triángulos rojos muestran las galaxias más brillantes que $K_{s_0} < 14.3$ mag, y los círculos celestes representan a las galaxias incluidas a la muestra en un nuevo radio de 18 minutos de arco.

ser ligeramente negativa, de modo que se vuelve una tarea complicada analizar la pertenencia a candidatos solo con estos diagramas. La principal dificultad radica en que no sabemos si la pendiente no ajusta a los valores esperados porque los miembros no pertenecen al cúmulo y se trata de sobredensidades proyectadas en el espacio, o si es a causa del ambiente Galáctico. Ya que estamos tratando de trazar estructuras en la ZoA, trabajamos en un área con alta extinción Galáctica, y por ende las columnas de polvo pertenecientes al disco de la Galaxia nos bloquean información crucial de galaxias que podrían estar ubicadas en esas direcciones (ver Figura 6.24).

Un importante resultado de este trabajo, es que dada la alta extinción a bajas latitudes Galácticas se vuelve una tarea imposible utilizar cúmulos para trazar la Estructura a Gran Escala del Universo. Sin embargo, de los siete candidatos a trazadores en este trabajo podemos destacar que la RCS del candidato (3) con contribución de algunas galaxias miembros del candidato (7) resulta prometedora, y podría llevarse a cabo un estudio más exhaustivo en el área. Cabe destacar que para la confirmación de pertenencia de estas agrupaciones de fuentes extragalácticas se necesita un análisis detallado utilizando tanto técnicas automáticas

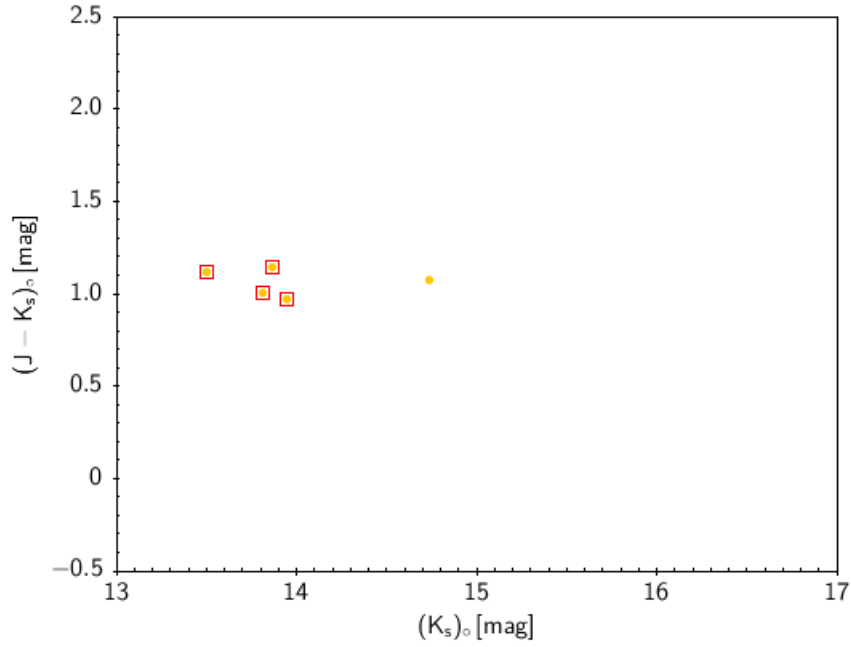


Figura 6.16: Candidato (1). Los puntos amarillos describen las 5 galaxias concentradas en dos anillos de 5 y 10 minutos de arco de radio, mientras que los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

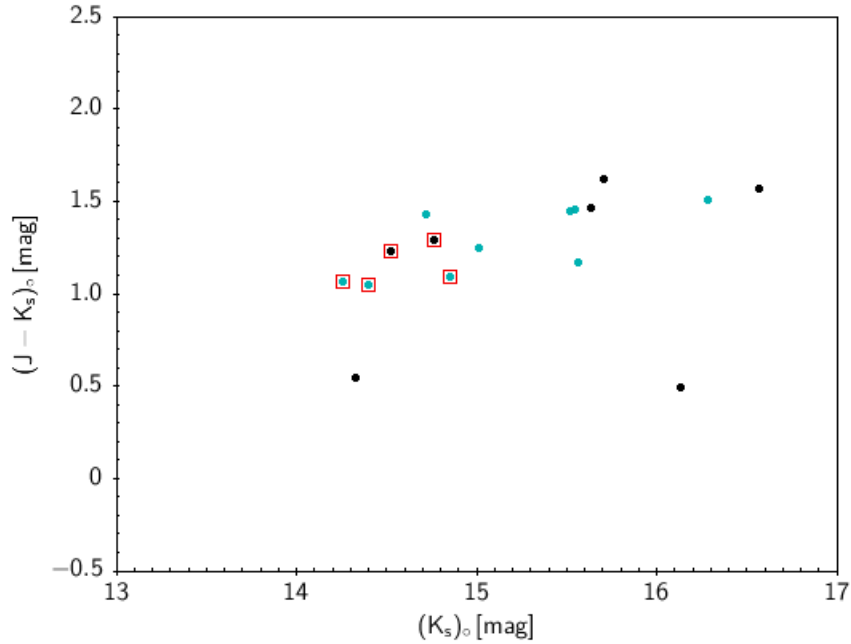


Figura 6.17: Candidato (2). Los puntos celestes describen las 9 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en negro las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

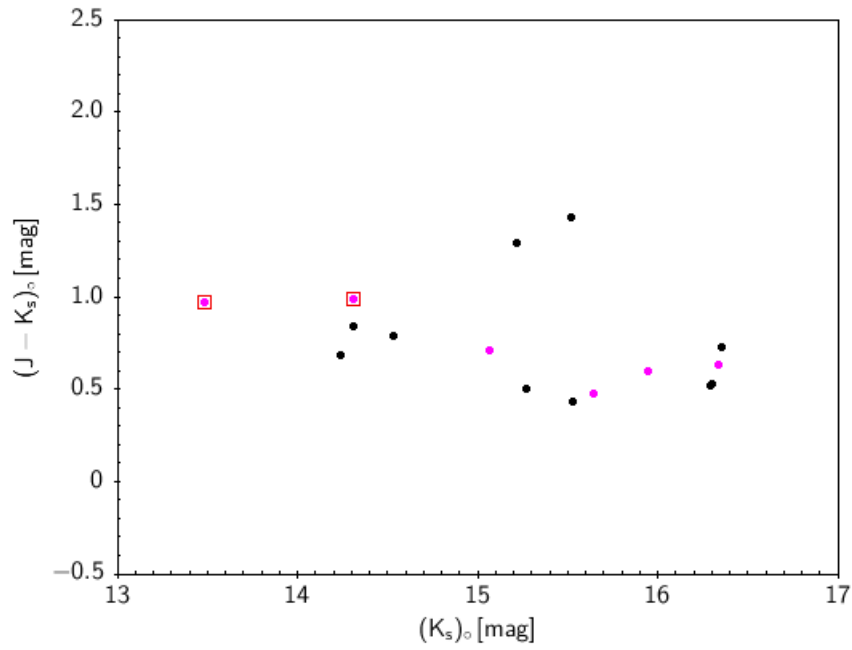


Figura 6.18: Candidato (3). Los puntos fucsias describen las 6 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en negro las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

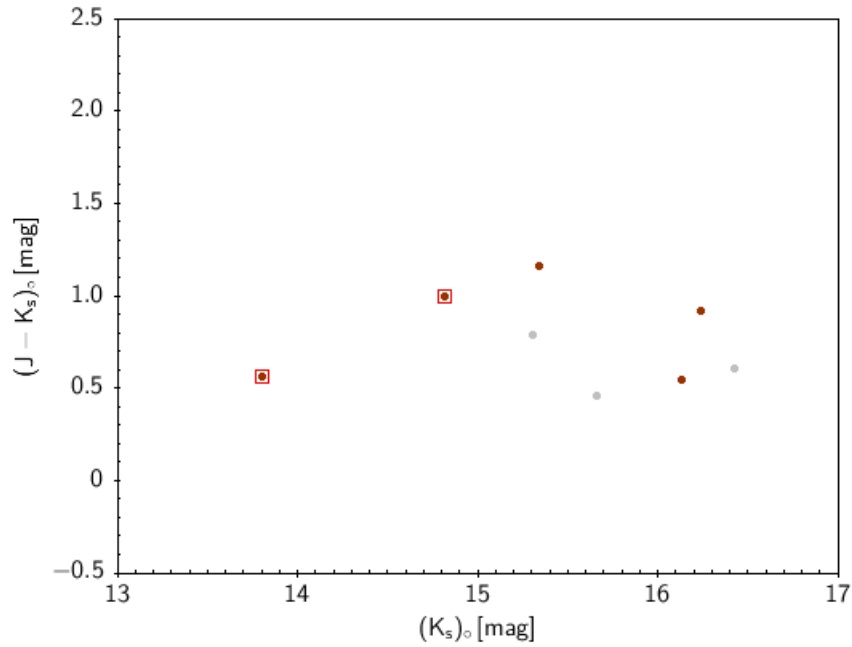


Figura 6.19: Candidato (4). Los puntos cafés describen las 5 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en gris las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

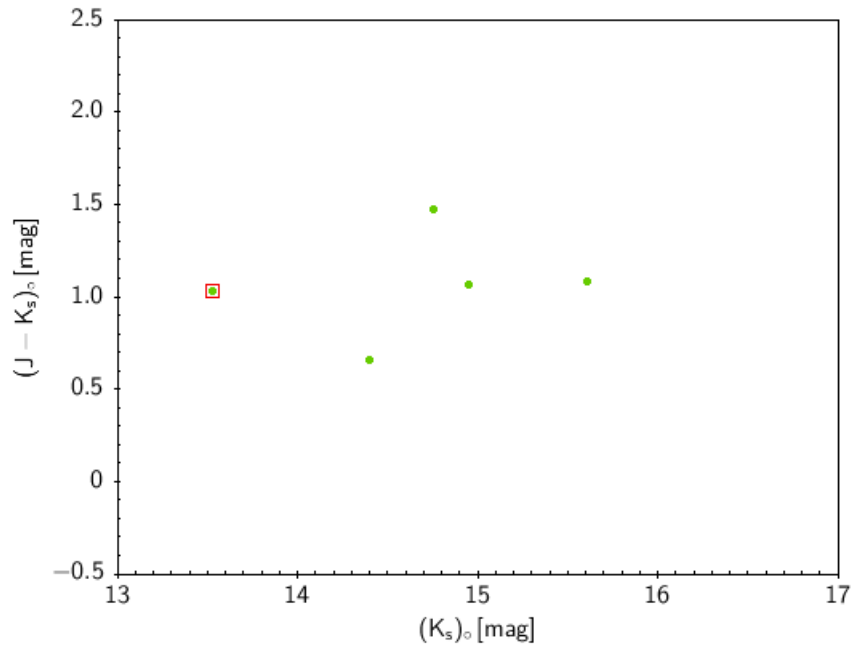


Figura 6.20: Candidato (5). Los puntos verdes describen las 5 galaxias concentradas dos anillos de 5 y 10 minutos de arco de radio, mientras que los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

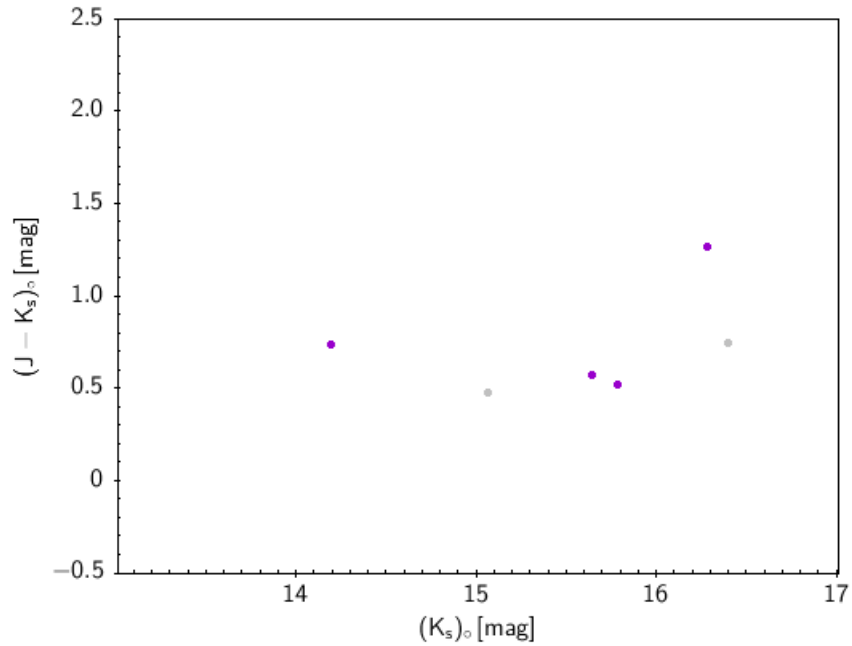


Figura 6.21: Candidato (6). Los puntos morados describen las 5 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en gris las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

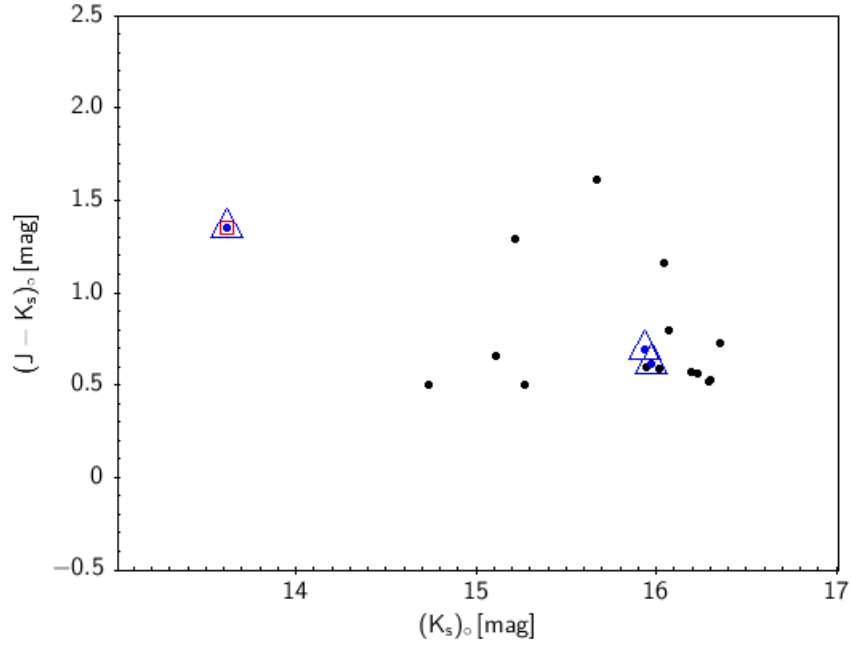


Figura 6.22: Candidato (7). Los triángulos azules describen las 5 galaxias concentradas en un anillo de 5 minutos de arco de radio y los puntos en negro las galaxias entre el primer anillo y el segundo anillo de 10 minutos de arco de radio. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

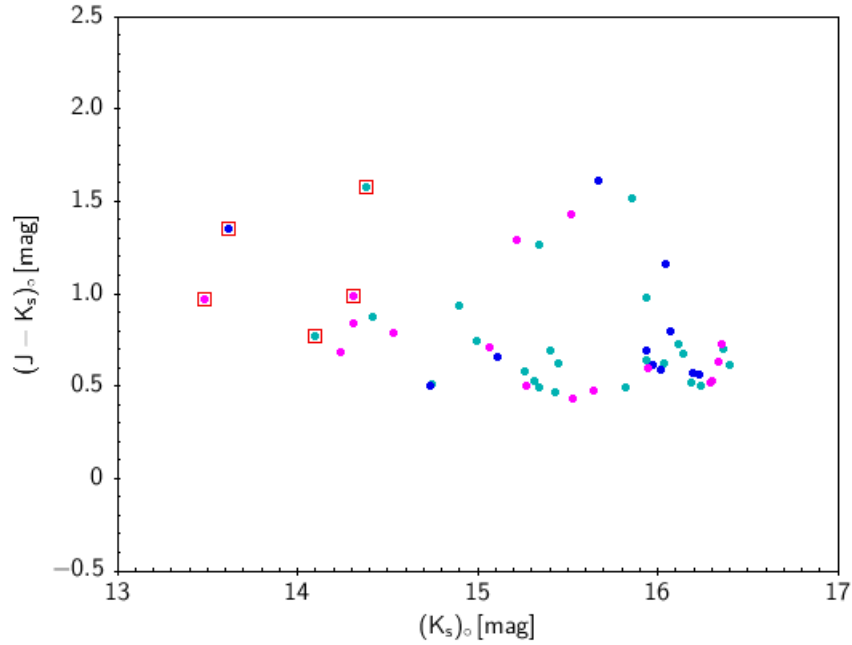


Figura 6.23: Candidato (3) + (7). Los puntos fucsias representan a las galaxias miembro del candidato (3), los puntos azules a las galaxias del candidato (7), mientras que los puntos celestes representan aquellos objetos que se han encontrado al expandir el radio de búsqueda a 18 minutos de arco. Los cuadrados rojos representan aquellas galaxias con contraparte en 2MASS PSC.

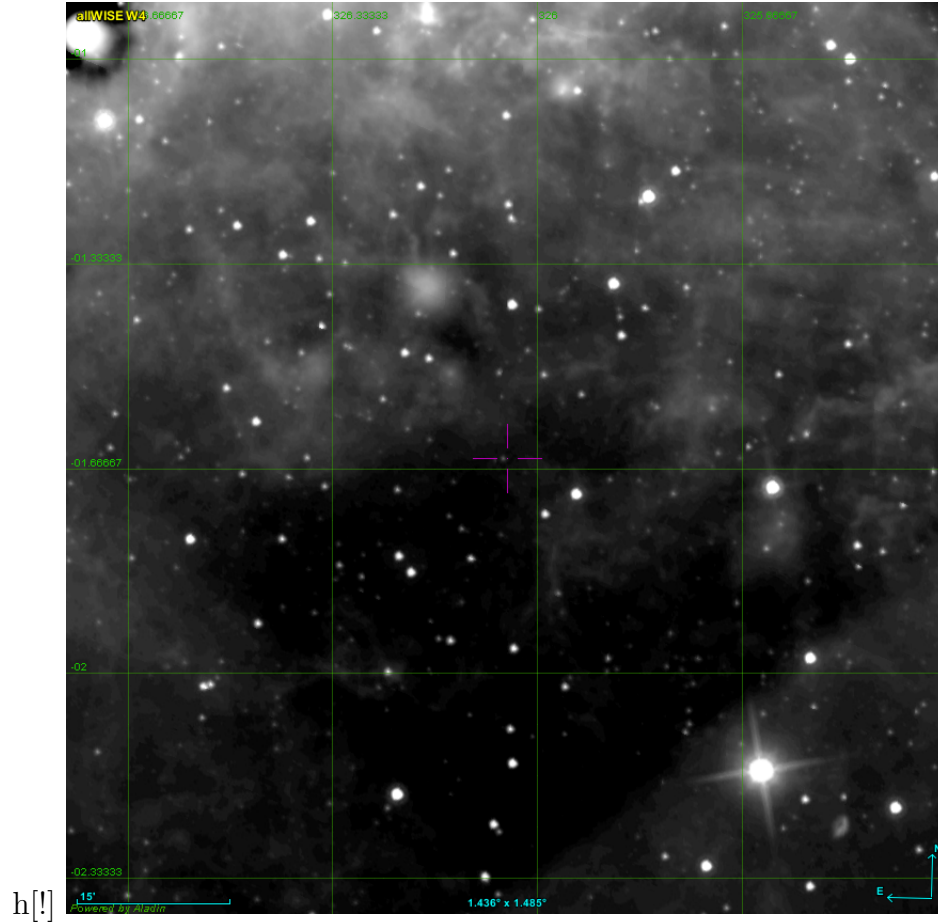


Figura 6.24: Imagen en infrarrojo lejano del programa AllWISE para el *tile* d022 utilizando la banda W4 de 22 μm . La imagen se encuentra centrada en $(l, b) = (326.0489^\circ, -1.6497^\circ)$, y está proyectada en un plano cartesiano en coordenadas Galácticas.

de *clustering* como datos espectroscópicos. Obtener el corrimiento al rojo de la concentración de fuentes es vital para calcular su distancia con precisión, sin embargo la herramienta RS sirve a *grosso* modo para generar catálogos de candidatos a cúmulos que deberán someterse posteriormente a un estudio más profundo.

6.5. Comparación con relevamientos anteriores

La importancia de este trabajo radica en el descubrimiento de nuevas fuentes extragalácticas con alta probabilidad de pertenecer al *Norma Bridge*. Para ello generamos un catálogo apropiado y complementario a otros trabajos en el área que nos permite estudiar la naturaleza y extensión del Gran Atractor. Sin embargo, para confirmar que no existen precedentes en la detección y caracterización de estos objetos, buscamos información en los principales relevamientos realizados en esta región y con posibilidades de detectar fuentes extragalácticas tras la Vía Láctea: el relevamiento infrarrojo 2MASS, con sus catálogos 2MASS PSC y 2MASX; el catálogo *AllWISE Data Release* (Cutri et al. 2013) generado como combinación de los resultados entregados por las misiones WISE y NEOWISE; y el catálogo de *The Chandra Source Catalog V2.0* (CSC; Evans et al. 2019).

Una vez generado nuestro catálogo con 358 galaxias confirmadas visualmente, correlacionamos las coordenadas ecuatoriales de nuestros objetos con los diferentes catálogos mencionados anteriormente. Ninguna tuvo detección en el catálogo 2MASX. 52 fueron correlacionadas con fuentes del catálogo 2MASS PSC (aproximadamente un 15 % del total de detecciones); 19 fueron detectadas en el catálogo AllWISE (5 % del total de detecciones) y solo 2 fuentes tuvieron *crossmatch* con el catálogo de CSC, lo que corresponde a un 0.5 % del total de galaxias confirmadas.

Como comparación, las magnitudes obtenidas en nuestro catálogo (PSF corregidas por extinción galáctica), van en el rango de $(K_s)_o \sim 12 - 16$ mag; mientras que para las 52 galaxias con contraparte en 2MASS PSC van desde el rango de $(K_s)_o \sim 12 - 15$ mag, siendo estas las más brillantes de la muestra.

Luego, para aquellas fuentes con detección en el catálogo AllWISE, se tienen 19 objetos extragalácticos, 12 detecciones compartidas además en 2MASS PSC, con magnitudes entre $(K_s)_o \sim 14 - 16$ mag. Mientras que para las dos fuentes en el

catálogo CSC, ambas tienen detecciones en 2MASS PSC. La primera fuente llamada CXOGSG J153916.7-530815 (*tile* d136) tiene una magnitud de $(K_s)_o = 13.29$ mag y CXOGSG J154241.0-521719 (*tile* d137), $(K_s)_o = 14.58$ mag.

En la Figura 6.25 se muestra la distribución espacial en coordenadas Galácticas de todas las galaxias confirmadas visualmente con sus respectivas contrapartes en los diferentes catálogos mencionados, además del rango de magnitudes en la banda K_s .

Por otro lado, en la Tabla 6.5 se describen 10 fuentes detectadas tanto por el relevamiento 2MASS, como AllWISE, y el catálogo CSC. Tenemos el identificador de objeto en 2MASS PSC (columna 1), coordenadas Galácticas en grados (columnas 2 y 3), Tipo clasificador si hubo *crossmatch* con AllWISE y/o *The Chandra Source Catalog* V2.0 (columnas 4 y 5), magnitudes PSF corregidas por extinción Galáctica (columnas 6, 7 y 8), y parámetros estructurales tales como el radio que encierra el 50 % de flujo total (columna 9), concentración (columna 10), elipticidad (columna 11), y por último el índice de Sérsic (columna 12).

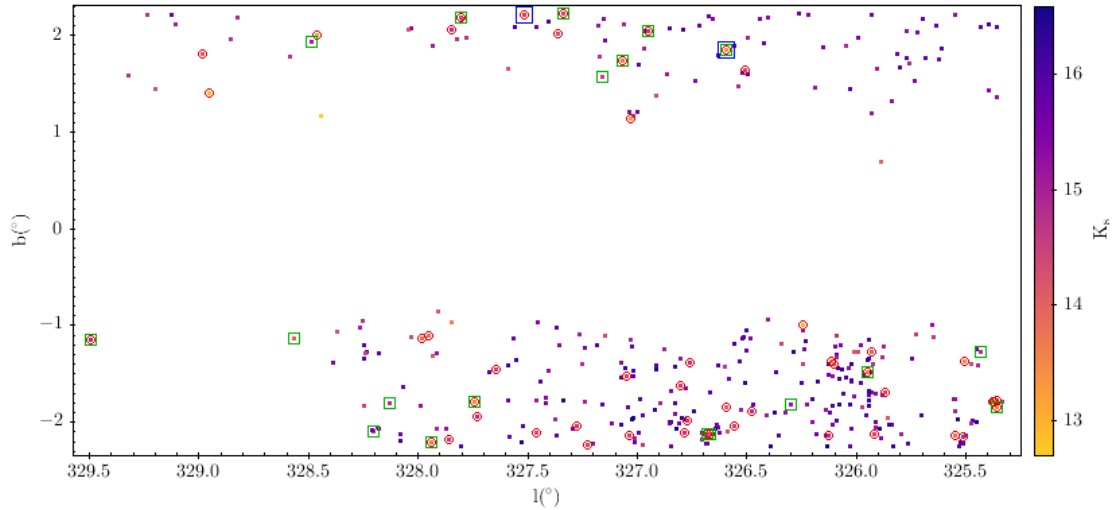


Figura 6.25: Distribución espacial en coordenadas Galácticas de galaxias detectadas en este trabajo utilizando el relevamiento VVV. En puntos se encuentran todas las fuentes confirmadas como galaxias tras inspección visual. En círculo rojo, aquellas con detección en 2MASS; en cuadrados verdes aquellas con detección en AllWISE; y en cuadrados azules, las fuentes de *The Chandra Source Catalog* V2.0 (CSC). Además, cada fuente tiene asociada una magnitud PSF en la banda K_s corregida por extinción Galáctica.

Como ejemplo de objetos extragalácticos en el *Norma Bridge*, vemos en la

Tabla 6.5: Ejemplos de 10 galaxias confirmadas por inspección visual con *crossmatch* en 2MASS, AllWISE y CSC

2MASS ID	l [grad]	b [grad]	AllWISE [tipo]	CSC [tipo]	(J) _o [mag]	(H) _o [mag]	(K _s) _o [mag]	R _{1/2} [arcsec]	C	e	n
2MASS J15480543-5648543	325.36065	-1.84359	IrS	-	14.62	13.84	13.50	1.31	4.30	0.25	2.97
2MASS J15564675-5611371	326.68289	-2.12033	IrS	-	15.45	14.79	14.40	1.25	4.68	0.03	2.82
2MASS J16005915-5515040	327.74622	-1.78877	IrS	-	14.62	13.84	13.48	1.29	4.57	0.38	4.41
2MASS J16035513-5525579	327.94009	-2.20022	IrS	-	14.60	14.11	13.76	1.37	4.42	0.33	3.67
2MASS J16070271-5336390	329.49388	-1.14531	IrS	-	12.37	12.07	14.88	1.26	3.96	0.20	0.89
2MASS J15391681-5308158	326.59188	1.84442	IrS	XrayS	14.63	13.84	13.29	1.13	4.54	0.17	2.49
2MASS J15414411-5223202	327.33825	2.22159	IrS	-	15.70	14.89	14.47	1.23	4.92	0.43	6.79
2MASS J15424101-5217187	327.51442	2.21417	-	XrayS	15.56	14.92	14.58	1.12	4.04	0.19	3.62
2MASS J15441865-5208235	327.80313	2.18076	IrS	-	15.22	14.66	14.40	1.13	3.81	0.10	1.96
2MASS J15482407-5152432	328.46029	1.99903	IrS	-	13.98	13.36	13.13	1.44	4.30	0.63	2.03

Figura 6.26 las dos galaxias detectadas en las 5 bandas del relevamiento VVV, 2MASS PSC y además en el catálogo CSC. En la Tabla 6.5 se listan sus propiedades fotométricas y morfológicas.

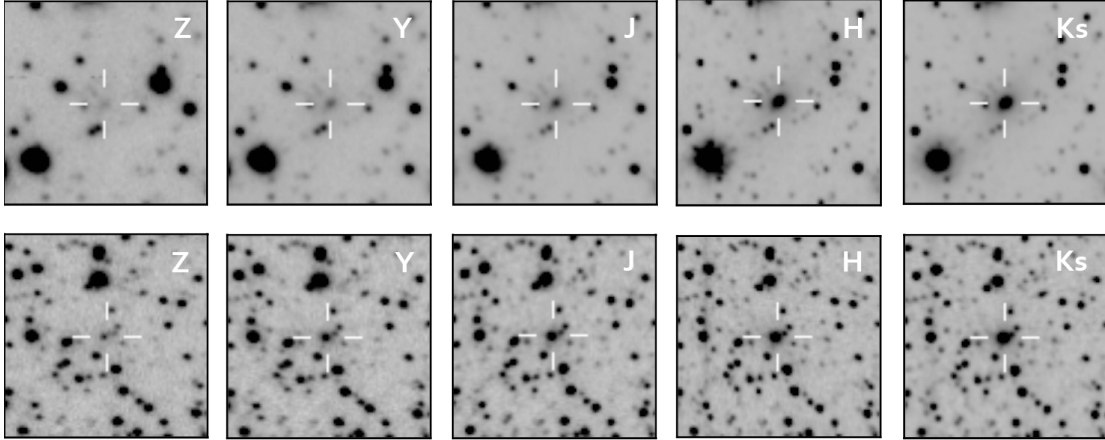


Figura 6.26: Ejemplos de galaxias confirmadas por inspección visual en las 5 bandas de VVV; Z, Y, J, H y K_s. En la imagen superior se muestra la detección del objeto CXOGSG J153916.7-530815 en el *tile* d136, mientras que en la imagen inferior observamos el objeto CXOGSG J154241.0-521719 en el *tile* d137. Cada imagen tiene un tamaño de 0.5×0.5 minutos de arco cuadrados, y están orientadas en coordenadas ecuatoriales.

Capítulo 7

Discusión y Conclusiones

Comprender el origen de la velocidad peculiar del Grupo Local y el dipolo en el CMB es uno de los objetivos más importantes en el estudio de estructuras a gran escala. En el Universo cercano, el campo de flujo de velocidades se encuentra en gran medida dominado por el Gran Atractor y el Supercúmulo de Shapley (Tonry et al. 2000b; Hudson et al. 2004). Sin embargo, modelos de reconstrucción teóricos sufren de importantes incertezas debido a la *Zone of Avoidance*, la cual oscurece alrededor de un 20 % del cielo creando un vacío de fuentes extragalácticas en la longitud de onda óptica (Kraan-Korteweg & Lahav 2000). Sin la correcta identificación de fuentes pertenecientes a estas estructuras mayores, no podremos estudiar con precisión la dinámica del Universo cercano.

El relevamiento VVV se presenta como una solución para descubrir la distribución de galaxias en la ZoA desde un acercamiento en infrarrojo cercano, pues el mayor inconveniente al que nos enfrentamos en la ZoA es el polvo de nuestra Galaxia y la extinción interestelar se ve reducida en comparación al rango óptico. Esto resulta en incertezas más pequeñas introducidas por correcciones de extinción, y por ende mediciones fotométricas más robustas.

En este trabajo se analiza un área de 18 grados cuadrados en 12 *tiles* del relevamiento VVV aplicando el procedimiento morfo-fotométrico descrito en Baravalle et al. (2018) a las bandas J, H y K_s, para la búsqueda de fuentes extragalácticas pertenecientes al Puente de Norma.

Se detectaron inicialmente 8994 candidatos extragalácticos, que tras aplicar los

criterios de selección definidos en el Capítulo 5, se redujeron a 358 galaxias confirmadas visualmente para formar parte de un catálogo general. Para estos objetos se obtuvieron parámetros fotométricos y morfológicos que fueron analizados en el Capítulo 6. Se concluyó en base a los parámetros fotométricos, que los objetos de nuestra muestra son al menos una magnitud más débiles en la banda K_s que aquellos con contraparte en el catálogo de 2MASS PSC (Ver Sección 6.5), mientras que los colores son más bien rojos. Por otro lado, los valores medios obtenidos en la Tabla 6.3 nos ayudan a caracterizar la muestra con parámetros estructurales tales como $R_{1/2}$, C , e y n . En el caso de la elipticidad ($e = 0.370 \pm 0.008$) y el radio que encierra el 50 % del flujo total de las fuentes ($R_{1/2} = 1.222 \pm 0.013$ segundos de arco), se concluye que las fuentes extragalácticas son pequeñas y circulares. Mientras que los valores obtenidos para el índice de Concentración ($C = 4.074 \pm 0.057$) y el índice de Sérsic ($n = 3.790 \pm 0.095$) se correlacionan bastante bien con galaxias de tipo temprano. Estos resultados están en concordancia con aquellos obtenidos en Baravalle et al. (2018), donde se explica que las observaciones en infrarrojo cercano son más sensibles a detectar galaxias de tipo temprano; más compactos y con mayor brillo superficial. La ventaja de estudiar este tipo de objetos extragalácticos es que son excelentes trazadores de cúmulos masivos y grupos de galaxias, en comparación a estudios conducidos en relevamientos HI, donde se encuentran principalmente galaxias de tipo tardío (Henning et al. 2010; McIntyre et al. 2015).

En la Sección 6.4, para analizar la existencia de posibles estructuras extragalácticas en el Puente de Norma (definido en la Sección 6.1), se estableció una metodología de análisis de *clustering* que consta en tres criterios: 1) Escoger una muestra de galaxias con ($K_{s_0} < 14.3$ mag) y trazar anillos con radios fijos de 5 y 10 minutos de arco. 2) Si en un radio de 10 minutos de arco no hay más de cinco galaxias en el anillo, entonces el candidato no cumple el criterio y se pasa a la siguiente galaxia. 3) Existe la unión de candidatos si los anillos de dos o más candidatos se cruzan, expandiendo el radio de búsqueda a la distancia entre las dos galaxias más brillantes de la muestra. Nos basamos en el *test* de Dressler & Shectman (1988) descrito en el trabajo de Nilo Castellón et al. (2014) para llevar a cabo este procedimiento. Al aplicar esta técnica encontramos siete candidatos a trazadores, todos concentrados en el *tile* d022, y se graficaron diagramas color-magnitud. Yee, Gladders, & López-Cruz (1999) explican que las galaxias de tipo temprano siguen una relación estrecha en este tipo de diagramas, denominada

“Secuencia Roja”. Por lo tanto y para comprobar la pertenencia de las galaxias seleccionadas tras el método de clustering a formar parte cúmulos o grupos de galaxias, utilizamos esta metodología con dos filtros de VVV (J y K_s), ya que no tenemos datos espectroscópicos que nos permitan analizar los corrimientos al rojo de las galaxias confirmadas visualmente en nuestros catálogos.

Pudimos concluir que dada la alta extinción en nuestra área de trabajo se vuelve complejo utilizar candidatos a cúmulos para trazar la Estructura a Gran Escala. Esto se debe a la dificultad de encontrar sobredensidades importantes de galaxias en bajas latitudes, además de la posible pérdida de información de miembros de cúmulos detrás de las densas columnas de polvo de la Vía Láctea. Sin embargo, pudimos rescatar la Secuencia Roja del candidato (3), junto a la contribución de algunos miembros del candidato (7) que parece ser prometedora, y estudios más detallados se deben llevar a cabo en el área. Por otro lado, notamos que aunque en los *tiles* d136 y d137 existen dos galaxias con contraparte en el catálogo del telescopio espacial Chandra, la baja cantidad de detecciones en estos dos *tiles* vuelve imposible reunir más de dos o tres miembros en un radio de 10 minutos de arco.

Otra conclusión relativa a la extinción es que a medida que nos acercamos al plano de la Galaxia ($b = 0^\circ$), la detección de fuentes decae rápidamente y aumentan las falsas detecciones como es el caso de las “cuncunas” descritas en la Sección 5.2 debido a la alta densidad estelar. Sin embargo, hemos estudiado el régimen de $A_{K_s} < 3.0$ mag, donde la extinción no se correlaciona linealmente con el número de detecciones de fuentes extragalácticas (Ver Figura 6.12). Esto nos lleva a concluir que la extinción no es un determinante absoluto para trazar estructuras a gran escala, y por ende la baja detección de galaxias en el *tile* d024 podría atribuirse a una característica propia del Puente de Norma.

Los candidatos que hemos presentado en este trabajo como posibles concentraciones pertenecientes al Puente de Norma deben ser estudiados con mayor detalle utilizando datos espectroscópicos para análisis dinámicos, confirmando la pertenencia a las estructuras adyacentes a la ZoA tales como el Supercúmulo de Norma y la Pared del Centaurus. Este trabajo se presenta como el primero de la colaboración para la búsqueda sistemática de cúmulos en el relevamiento VVV. A través de técnicas de *clustering* y catálogos apropiado de candidatos podemos dar pie a futuros trabajos para trazar La Estructura en Gran Escala en el Universo cercano

a través de la ZoA con el relevamiento VVV y su extensión, VISTA Variables in the Vía Láctea eXtended Survey (VVVX).

Por último, el catálogo de galaxias generado en este trabajo y sus resultados forman parte del artículo publicado por la colaboración en la revista científica Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: **The VVV near-IR galaxy catalogue beyond the Galactic disk** de *L. D. Baravalle, M. V. Alonso, D. Minniti, J. L. Nilo Castellón, M. Soto, C. Valotto, C. Villalón, D. Graña, E. B. Amôres, F. Milla Castro*. (Baravalle et al. 2021).

Bibliografía

- Abell, G. O., Corwin, Harold G., J., & Olowin, R. P. 1989, *Astrophys. J. Suppl.*, 70, 1
- Abraham, R. G., Valdes, F., Yee, H. K. C., & van den Bergh, S. 1994, *Astrophys. J.*, 432, 75
- Alonso-García, J., Saito, R. K., Hempel, M., et al. 2018, *Astron. Astrph.*, 619, A4
- Amôres, E. B., Sodré, L., Minniti, D., et al. 2012, *Astron. J.*, 144, 127
- Annunziatella, M., Mercurio, A., Brescia, M., Caviuoti, S., & Longo, G. 2013, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 125, 68
- Arnaboldi, M., Neeser, M. J., Parker, L. C., et al. 2007, *The Messenger*, 127, 28
- Athanassoula, E. 1984, *Phys. Rept.*, 114, 319
- Baravalle, L. D., Alonso, M. V., Minniti, D., et al. 2021, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 502, 601
- Baravalle, L. D., Alonso, M. V., Nilo Castellón, J. L., Beamín, J. C., & Minniti, D. 2018, *Astron. J.*, 155, 46
- Baravalle, L. D., Nilo Castellón, J. L., Alonso, M. V., et al. 2019, *Astrophys. J.*, 874, 46
- Bautz, L. P. & Morgan, W. W. 1970, *Astrophys. J. Let.*, 162, L149
- Beard, S. M., MacGillivray, H. T., & Thanisch, P. F. 1990, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 247, 311
- Bennett, C. L., Halpern, M., Hinshaw, G., et al. 2003, *Astrophys. J. Suppl.*, 148, 1

- Bertin, E. 2011, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 442, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*, ed. I. N. Evans, A. Accomazzi, D. J. Mink, & A. H. Rots, 435
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *Astron. Astroph. Supplement (Journal)*, 117, 393
- Binggeli, B., Tammann, G. A., & Sandage, A. 1987, *Astron. J.*, 94, 251
- Binney, J., Gerhard, O., & Spergel, D. 1997, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 288, 365
- Binney, J., Gerhard, O. E., Stark, A. A., Bally, J., & Uchida, K. I. 1991, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 252, 210
- Binney, J. & Tremaine, S. 2008, *Galactic Dynamics: Second Edition*
- Blitz, L. & Spergel, D. N. 1991, *Astrophys. J.*, 379, 631
- Boehringer, H., Neumann, D. M., Schindler, S., & Kraan-Korteweg, R. C. 1996, *Astrophys. J.*, 467, 168
- Bond, J. R., Kofman, L., & Pogosyan, D. 1996, *Nature*, 380, 603
- Bonnarel, F., Fernique, P., Bienaymé, O., et al. 2000, *Astron. Astroph. Supplement (Journal)*, 143, 33
- Bureau, M., Mould, J. R., & Staveley-Smith, L. 1996, *Astrophys. J.*, 463, 60
- Buta, R. J. & McCall, M. L. 1999, *Astrophys. J. Suppl.*, 124, 33
- Carney, B. W., Fulbright, J. P., Terndrup, D. M., Suntzeff, N. B., & Walker, A. R. 1995, *Astron. J.*, 110, 1674
- Catelan, M., Minniti, D., Lucas, P. W., et al. 2011, in *RR Lyrae Stars, Metal-Poor Stars, and the Galaxy*, ed. A. McWilliam, Vol. 5, 145
- Cautun, M., van de Weygaert, R., Jones, B. J. T., & Frenk, C. S. 2014, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 441, 2923
- Ceccarelli, L., Ruiz, A. N., Lares, M., et al. 2016, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 461, 4013
- Chamaraux, P., Cayatte, V., Balkowski, C., & Fontanelli, P. 1990, *Astron. Astrph.*, 229, 340

- Chluba, J. 2014, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 443, 1881
- Cioni, M. R. L., Clementini, G., Girardi, L., et al. 2011, *Astron. Astrph.*, 527, A116
- Coldwell, G., Alonso, S., Duplancic, F., et al. 2014, *Astron. Astrph.*, 569, A49
- Colless, M., Dalton, G., Maddox, S., et al. 2001, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 328, 1039
- Colless, M., Ellis, R. S., Taylor, K., & Hook, R. N. 1990, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 244, 408
- Conselice, C. J., Bershad, M. A., & Jangren, A. 2000, *Astrophys. J.*, 529, 886
- Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., et al. 2003, 2MASS All Sky Catalog of point sources.
- Cutri, R. M., Wright, E. L., Conrow, T., et al. 2013, Explanatory Supplement to the AllWISE Data Release Products, Explanatory Supplement to the AllWISE Data Release Products
- Da Costa, G. S. 1992, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 23, *Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques*, ed. S. B. Howell, 90
- Dalton, G. B., Caldwell, M., Ward, A. K., et al. 2006, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 6269, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, ed. I. S. McLean & M. Iye, 62690X
- Davis, M., Huchra, J., Latham, D. W., & Tonry, J. 1982, *Astrophys. J.*, 253, 423
- de Vaucouleurs, G. 1948, *Annales d'Astrophysique*, 11, 247
- Dekel, A. 1994, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 32, 371
- Desai, S., Armstrong, R., Mohr, J. J., et al. 2012, *Astrophys. J.*, 757, 83
- Dicke, R. H. 1964, *Nature*, 202, 432

- Dirac, P. A. M. 1938, Proceedings of the Royal Society of London Series A, 165, 199
- Dodd, R. J. & Brand, P. W. J. L. 1976, Astron. Astroph. Supplement (Journal), 25, 519
- Doi, M., Fukugita, M., & Okamura, S. 1993, Mon. Not. R. Astron. Soc., 264, 832
- Dressler, A., Faber, S. M., Burstein, D., et al. 1987, Astrophys. J. Let., 313, L37
- Dressler, A. & Shectman, S. A. 1988, Astron. J., 95, 985
- Dreyer, J. L. E. 1888, , 49, 1
- Dreyer, J. L. E. 1895, , 51, 185
- Ebeling, H., Edge, A. C., Allen, S. W., et al. 2000a, Mon. Not. R. Astron. Soc., 318, 333
- Ebeling, H., Mullis, C. R., & Tully, B. R. 1999, in AAS/High Energy Astrophysics Division, Vol. 4, AAS/High Energy Astrophysics Division #4, 04.01
- Ebeling, H., Mullis, C. R., & Tully, R. B. 2000b, in AAS/High Energy Astrophysics Division, Vol. 5, AAS/High Energy Astrophysics Division #5, 14.07
- Ebeling, H., Mullis, C. R., & Tully, R. B. 2002, Astrophys. J., 580, 774
- Edge, A., Sutherland, W., Kuijken, K., et al. 2013, The Messenger, 154, 32
- Edge, A. C., Stewart, G. C., Fabian, A. C., & Arnaud, K. A. 1990, Mon. Not. R. Astron. Soc., 245, 559
- Einasto, J., Joeveer, M., & Saar, E. 1980, Mon. Not. R. Astron. Soc., 193, 353
- Einasto, M., Saar, E., Liivamägi, L. J., et al. 2007, Astron. Astrph., 476, 697
- Einasto, M., Tago, E., Jaaniste, J., Einasto, J., & Andernach, H. 1997, Astron. Astroph. Supplement (Journal), 123, 119
- Emerson, J. P. & Sutherland, W. J. 2010, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III, ed. L. M. Stepp, R. Gilmozzi, & H. J. Hall, 773306

- Erdoğdu, P., Lahav, O., Huchra, J. P., et al. 2006, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 373, 45
- Evans, I. N., Allen, C., Anderson, C. S., et al. 2019, in *AAS/High Energy Astrophysics Division*, Vol. 17, AAS/High Energy Astrophysics Division, 114.01
- Fairall, A. P., Woudt, P. A., & Kraan-Korteweg, R. C. 1998, *Astron. Astroph. Supplement (Journal)*, 127, 463
- Fitzpatrick, E. L. 1999, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 111, 63
- Fixsen, D. J., Cheng, E. S., Gales, J. M., et al. 1996, *Astrophys. J.*, 473, 576
- Galdeano, D., Pereyra, L., Duplancic, F., et al. 2021, *Astron. Astrph.*, 646, A146
- Geller, M. J. & Huchra, J. P. 1989, *Science*, 246, 897
- Giovanelli, R. & Haynes, M. P. 1982, *Astron. J.*, 87, 1355
- Harmon, R. & Mamon, G. 1993, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 43, *Sky Surveys. Protostars to Protogalaxies*, ed. B. T. Soifer, 15
- Haynes, M. P. & Giovanelli, R. 1988, *Large-scale structure in the local universe: the Pisces-Perseus supercluster.*, ed. V. C. Rubin & G. V. Coyne, 31–70
- Henning, P. A., Kraan-Korteweg, R. C., & Staveley-Smith, L. 2005, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 329, *Nearby Large-Scale Structures and the Zone of Avoidance*, ed. A. P. Fairall & P. A. Woudt, 199
- Henning, P. A., Rivers, A., Kraan-Korteweg, R. C., et al. 1995, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, Vol. 187, *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, 53.05
- Henning, P. A., Springob, C. M., Minchin, R. F., et al. 2010, *Astron. J.*, 139, 2130
- Henning, P. A., Staveley-Smith, L., Ekers, R. D., et al. 2000, *Astron. J.*, 119, 2686
- Henning, P. A., Staveley-Smith, L., Kraan-Korteweg, R. C., & Sadler, E. M. 1999, , 16, 35
- Herschel, J. F. W. 1864, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 154, 1

- Hiemer, A., Barden, M., Kelvin, L. S., Häußler, B., & Schindler, S. 2014, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 444, 3089
- Hubble, E. 1934, *Astrophys. J.*, 79, 8
- Hubble, E. P. 1926, *Astrophys. J.*, 64, 321
- Hudson, M. J., Smith, R. J., Lucey, J. R., & Branchini, E. 2004, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 352, 61
- Irwin, M. J. 1985, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 214, 575
- Irwin, M. J., Lewis, J., Hodgkin, S., et al. 2004, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 5493, *Optimizing Scientific Return for Astronomy through Information Technologies*, ed. P. J. Quinn & A. Bridger, 411–422
- Jarrett, T. 2004, , 21, 396
- Jarrett, T. H., Chester, T., Cutri, R., et al. 2000a, *Astron. J.*, 120, 298
- Jarrett, T. H., Chester, T., Cutri, R., et al. 2000b, *Astron. J.*, 119, 2498
- Jarvis, M. J., Bonfield, D. G., Bruce, V. A., et al. 2013, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 428, 1281
- Jerjen, H. & Tammann, G. A. 1993, *Astron. Astrph.*, 276, 1
- Jones, L. R., Fong, R., Shanks, T., Ellis, R. S., & Peterson, B. A. 1991, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 249, 481
- Joye, W. A. & Mandel, E. 2003, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 295, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XII*, ed. H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski, & R. N. Hook, 489
- Kirshner, R. P., Oemler, A., J., & Schechter, P. L. 1978, *Astron. J.*, 83, 1549
- Kolatt, T., Dekel, A., & Lahav, O. 1995, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 275, 797
- Komatsu, E., Smith, K. M., Dunkley, J., et al. 2011, *Astrophys. J. Suppl.*, 192, 18

- Kraan-Korteweg, R. C. 2000, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 218, *Mapping the Hidden Universe: The Universe behind the Milky Way - The Universe in HI*, ed. R. C. Kraan-Korteweg, P. A. Henning, & H. Andernach, 19
- Kraan-Korteweg, R. C., Cluver, M. E., Bilicki, M., et al. 2017, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 466, L29
- Kraan-Korteweg, R. C. & Huchtmeier, W. K. 1992, *Astron. Astrph.*, 266, 150
- Kraan-Korteweg, R. C. & Lahav, O. 2000, , 10, 211
- Kraan-Korteweg, R. C., Schröder, A., Mamon, G. A., & Ruphy, S. 1998, *Large-Scale Structures Behind the Milky way from Near-Ir Surveys*, ed. N. Epchtein, Vol. 230, 209
- Kraan-Korteweg, R. C. & Woudt, P. A. 1993, in *Cosmic Velocity Fields*, ed. F. Bouchet & M. Lachieze-Rey, Vol. 9, 557
- Kraan-Korteweg, R. C. & Woudt, P. A. 1999, , 16, 53
- Kraan-Korteweg, R. C., Woudt, P. A., Cayatte, V., et al. 1996, *Nature*, 379, 519
- Kron, R. G. 1980, *Astrophys. J. Suppl.*, 43, 305
- Lahav, O., Yamada, T., Scharf, C., & Kraan-Korteweg, R. C. 1993, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 262, 711
- Lares, M., Luparello, H. E., Maldonado, V., et al. 2017, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 470, 85
- Lauberts, A. 1982, *ESO/Uppsala survey of the ESO(B) atlas*
- Lawrence, A., Warren, S. J., Almaini, O., et al. 2007, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 379, 1599
- Le Fevre, O., Bijaoui, A., Mathez, G., Picat, J. P., & Lelievre, G. 1986, *Astron. Astrph.*, 154, 92
- Lynden-Bell, D., Faber, S. M., Burstein, D., et al. 1988, *Astrophys. J.*, 326, 19

- Maddox, S. J., Efstathiou, G., & Sutherland, W. J. 1990, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 246, 433
- Mainzer, A., Bauer, J., Grav, T., et al. 2011, *Astrophys. J.*, 731, 53
- Mathis, J. S. 1990, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 28, 37
- Mauro, F., Moni Bidin, C., Chené, A. N., et al. 2013, , 49, 189
- Mazure, A., Casoli, F., Durret, F., & Gerbal, D. 1998, A new vision of an old cluster: untangling Coma Berenices. *Proceedings*.
- McCracken, H. J., Milvang-Jensen, B., Dunlop, J., et al. 2012, *Astron. Astrph.*, 544, A156
- McIntyre, T. P., Henning, P. A., Minchin, R. F., Momjian, E., & Butcher, Z. 2015, *Astron. J.*, 150, 28
- McMahon, R. G., Banerji, M., Gonzalez, E., et al. 2013, *The Messenger*, 154, 35
- McPherson, A. M., Born, A., Sutherland, W., et al. 2006, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 6267, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, ed. L. M. Stepp, 626707
- Minniti, D., Lucas, P. W., Emerson, J. P., et al. 2010, , 15, 433
- Morgan, W. W. 1958, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 70, 364
- Mutabazi, T. 2021, *Astrophys. J.*, 911, 16
- Mutabazi, T., Blyth, S. L., Woudt, P. A., et al. 2014, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 439, 3666
- Nagayama, T., Woudt, P. A., Nagashima, C., et al. 2004, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 354, 980
- Nagayama, T., Woudt, P. A., Wakamatsu, K., et al. 2006, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 368, 534
- Nakamura, O., Fukugita, M., Yasuda, N., et al. 2003, *Astron. J.*, 125, 1682

- Nilo Castellón, J. L., Alonso, M. V., García Lambas, D., et al. 2014, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 437, 2607
- Nilson, P. 1973, *Uppsala general catalogue of galaxies*
- O'Mill, A. L., Alonso, M. V., Valotto, C., & Nilo Castellón, J. L. 2019, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 485, 4474
- Pantoja, C. A., Altschuler, D. R., Giovanardi, C., & Giovanelli, R. 1997, *Astron. J.*, 113, 905
- Park, C. & Choi, Y.-Y. 2005, *Astrophys. J. Let.*, 635, L29
- Peebles, P. J. E. 1980, *The large-scale structure of the universe*
- Peebles, P. J. E. 1994, *Astrophys. J.*, 429, 43
- Pellegrini, P. S., da Costa, L. N., Huchra, J. P., Latham, D. W., & Willmer, C. N. A. 1990, *Astron. J.*, 99, 751
- Penzias, A. A. & Wilson, R. W. 1965, *Astrophys. J.*, 142, 419
- Pomarède, D., Hoffman, Y., Courtois, H. M., & Tully, R. B. 2017, *Astrophys. J.*, 845, 55
- Pomarède, D., Tully, R. B., Graziani, R., et al. 2020, *Astrophys. J.*, 897, 133
- Proust, D., Quintana, H., Carrasco, E. R., et al. 2006, *Astron. Astrph.*, 447, 133
- Radburn-Smith, D. J., Lucey, J. R., Woudt, P. A., Kraan-Korteweg, R. C., & Watson, F. G. 2006, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 369, 1131
- Ramatsoku, M., Verheijen, M. A. W., Kraan-Korteweg, R. C., et al. 2016, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 460, 923
- Reid, N. & Gilmore, G. 1982, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 201, 73
- Riad, I. F., Kraan-Korteweg, R. C., & Woudt, P. A. 2010, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 401, 924
- Said, K., Kraan-Korteweg, R. C., Jarrett, T. H., Staveley-Smith, L., & Williams, W. L. 2016a, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 462, 3386

- Said, K., Kraan-Korteweg, R. C., Staveley-Smith, L., et al. 2016b, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 457, 2366
- Saito, R., Hempel, M., Alonso-García, J., et al. 2010, *The Messenger*, 141, 24
- Saito, R. K., Minniti, D., Angeloni, R., et al. 2013, *Astron. Astrph.*, 554, A123
- Saito, R. K., Minniti, D., Dias, B., et al. 2012, *Astron. Astrph.*, 544, A147
- Scaramella, R., Baiesi-Pillastrini, G., Chincarini, G., Vettolani, G., & Zamorani, G. 1989, *Nature*, 338, 562
- Schechter, P. 1976, *Astrophys. J.*, 203, 297
- Schlaflly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, *Astrophys. J.*, 737, 103
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *Astrophys. J.*, 500, 525
- Schröder, A., Kraan-Korteweg, R. C., & Mamon, G. A. 1999, , 16, 42
- Schröder, A. C., Mamon, G. A., Kraan-Korteweg, R. C., & Woudt, P. A. 2007, *Astron. Astrph.*, 466, 481
- Schröder, A. C., van Driel, W., & Kraan-Korteweg, R. C. 2019, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 482, 5167
- Sciamia, D. W. 1953, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 113, 34
- Scoville, N., Aussel, H., Brusa, M., et al. 2007, *Astrophys. J. Suppl.*, 172, 1
- Sebok, W. L. 1979, *Astron. J.*, 84, 1526
- Seldner, M., Siebers, B., Groth, E. J., & Peebles, P. J. E. 1977, *Astron. J.*, 82, 249
- Sersic, J. L. 1968, *Atlas de Galaxias Australes*
- Shapley, H. 1961, *Galaxies*.
- Shimasaku, K., Fukugita, M., Doi, M., et al. 2001, *Astron. J.*, 122, 1238
- Skelton, R. E., Woudt, P. A., & Kraan-Korteweg, R. C. 2009, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 396, 2367

- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., & Weinberg. 2006, *Astron. J.*, 131, 1163
- Sorce, J. G., Colless, M., Kraan-Korteweg, R. C., & Gottlöber, S. 2017, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 471, 3087
- Sorce, J. G., Gottlöber, S., Hoffman, Y., & Yepes, G. 2016, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 460, 2015
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al. 2005, *Nature*, 435, 629
- Staveley-Smith, L., Juraszek, S., Koribalski, B. S., et al. 1998, *Astron. J.*, 116, 2717
- Staveley-Smith, L., Kraan-Korteweg, R. C., Schröder, A. C., et al. 2016, *Astron. J.*, 151, 52
- Stetson, P. B. 1987, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 99, 191
- Stetson, P. B. 1994, in *Calibrating Hubble Space Telescope*, ed. J. C. Blades & S. J. Osmer, 89
- Sutherland, W., Emerson, J., Dalton, G., et al. 2015, *Astron. Astrph.*, 575, A25
- Tammann, G. A. & Sandage, A. 1985, *Astrophys. J.*, 294, 81
- Tamura, T., Fukazawa, Y., Kaneda, H., et al. 1998, *Pub. Astron. Soc. Jap.*, 50, 195
- Tonry, J. L., Blakeslee, J. P., Ajhar, E. A., & Dressler, A. 2000a, *Astrophys. J.*, 530, 625
- Tonry, J. L., Blakeslee, J. P., Ajhar, E. A., & Dressler, A. 2000b, *Astrophys. J.*, 530, 625
- Tully, R. B., Courtois, H., Hoffman, Y., & Pomarède, D. 2014, *Nature*, 513, 71
- Tully, R. B. & Fisher, J. R. 1977, *Astron. Astrph.*, 500, 105
- van de Weygaert, R. & Bond, J. R. 2008, *Clusters and the Theory of the Cosmic Web*, ed. M. Plionis, O.ópez-Cruz@, & D. Hughes, Vol. 740, 335

- van den Bergh, S. 2000, The Galaxies of the Local Group
- van Driel, W., Schneider, S. E., Kraan-Korteweg, R. C., & Monnier Ragaigine, D. 2009, *Astron. Astrph.*, 505, 29
- Voges, W., Aschenbach, B., Boller, T., et al. 1999, *Astron. Astrph.*, 349, 389
- Vorontsov-Vel'Yaminov, B. A. & Arkhipova, V. P. 1963, *Trudy Gosudarstvennogo Astronomicheskogo Instituta*, 33, 1
- Vorontsov-Vel'Yaminov, B. A. & Arkhipova, V. P. 1974, *Trudy Gosudarstvennogo Astronomicheskogo Instituta*, 46, 1
- Williams, W. L., Kraan-Korteweg, R. C., & Woudt, P. A. 2014, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 443, 41
- Woudt, P. A. 1998, PhD thesis, -
- Woudt, P. A. & Kraan-Korteweg, R. C. 2000, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 218, *Mapping the Hidden Universe: The Universe behind the Milky Way - The Universe in HI*, ed. R. C. Kraan-Korteweg, P. A. Henning, & H. Andernach, 193
- Woudt, P. A. & Kraan-Korteweg, R. C. 2001, *Astron. Astrph.*, 380, 441
- Woudt, P. A., Kraan-Korteweg, R. C., Lucey, J., Fairall, A. P., & Moore, S. A. W. 2008, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 383, 445
- Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, *Astron. J.*, 140, 1868
- Yee, H. K. C. 1991, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 103, 396
- Yee, H. K. C., Gladders, M. D., & López-Cruz, O. 1999, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 191, *Photometric Redshifts and the Detection of High Redshift Galaxies*, ed. R. Weymann, L. Storrie-Lombardi, M. Sawicki, & R. Brunner, 166
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, John E., J., et al. 2000, *Astron. J.*, 120, 1579