

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



Trabajo de fin de máster

Estudio observacional de galaxias barradas según su entorno

Observational study of barred galaxies depending on environment

Azahara Rojas Roncero

Director: José Alfonso López Aguerri (IAC)

Máster de Astrofísica

Julio 2022

Agradecimientos

Primero muchas gracias a Alfonso por su tiempo y dedicación, por todo el aprendizaje que me llevo de su trabajo y experiencia y por su cercanía y simpatía. Ha sido un placer compartir este tiempo con él.

Nada de esto sería posible sin el apoyo incondicional de mi familia, que nunca me ha abandonado en mi pasión y empeño por alcanzar las estrellas. Gracias especialmente hoy y siempre a mis padres y hermana que siempre me empujan para llegar más lejos. Y a esa pequeña vida llena de curiosidad por las estrellas.

Muchos son, afortunadamente, los compañeros de este viaje. No puedo nombrarles a todos, llevaría mucho espacio y correría el riesgo de olvidarme de alguien, y eso no sería justo, pero todos ellos saben quienes son. Especial mención a mi rubio y a mis incondicionales físicos de Madrid por aguantarme y hacerme la vida más bonita. También a esa gente que hizo mi estancia en la isla tan especial.

Amigos, tanto dentro como fuera de la facultad, tanto dentro como fuera de la isla, tanto dentro como fuera de Madrid, tanto dentro como fuera de España. Compañeros.

UN ENORME GRACIAS, OS QUIERO.

Declaración

Declaro ser la autora del Trabajo de Fin de Máster que presento como culminación de mis estudios de Máster de Astrofísica de la Universidad de La Laguna, siendo el trabajo original e inédito y producto de mi contribución intelectual, bajo la tutela de uno o varios profesores de esta facultad. Todos los datos y referencias a textos y materiales ya publicados están debidamente identificados y referenciados en el texto y en las notas bibliográficas.

En Tenerife a 30 de junio de 2022

Universidad de La Laguna
Facultad de Ciencias Físicas

©2022 Azahara Rojas Roncero. Todos los derechos reservados.

Este trabajo ha sido realizado como Trabajo de Fin de Máster del Máster de Astrofísica de la facultad de Ciencias Físicas de la ULL. Está protegido de copyright y para su uso es preciso el permiso de la autora.

Referencia de este trabajo

Rojas Roncero, Azahara. Estudio observacional de galaxias barradas según su entorno. Trabajo de Fin de Máster. Tenerife: Universidad de La Laguna, Facultad de Ciencias Físicas, 2022.

Resumen

Partiendo de los catálogos VCC y EVCC confeccionados para el cúmulo de Virgo, han sido analizadas 60 galaxias barradas de tipos morfológicos SB0 y SBa. Se amplió el número de galaxias a analizar añadiendo un grupo de galaxias de background y similares tipos morfológicos en el rango de magnitudes absolutas donde no aparecían galaxias en el catálogo. Estas galaxias han sido divididas en tres grupos atendiendo al entorno en el que se encuentran. Con ayuda del diagrama de espacio-fase se han determinado estas zonas: galaxias situadas en la zona virializada de Virgo, que son aquellas que han sufrido el entorno del cúmulo más intensamente ya que se encuentran en el cúmulo desde hace varios Gaños, galaxias situadas en la zona de infall, que son miembros del cúmulo que ya han sentido los efectos del entorno pero menos intensamente ya que su llegada al cúmulo ha sido hace $\approx 1Gyr$ y por último galaxias de background o de campo que no pertenecen al cúmulo. De las 60 galaxias analizadas de la muestra 25 de ellas pertenecen a la clasificación de zona virializada, 11 a la zona de infall y 24 pertenecen al campo.

Se ha llevado a cabo, para cada galaxia de la muestra, un análisis de las isofotas de brillo superficial obteniendo los perfiles radiales de elipticidad y ángulo de posición de las isofotas galácticas. Estos perfiles permiten conocer el ángulo de posición y la inclinación de los discos galácticos. Esto ha sido llevado a cabo mediante la tarea ELLIPSE presente en el paquete ISOPHOTE del programa de tratamiento de imágenes IRAF. Además para el tratamiento de datos se han usado programas en el lenguaje de programación de PYTHON e IDL.

Estos valores obtenidos de la tarea ELLIPSE se usarán como condición inicial para el posterior análisis de Fourier del brillo superficial de las galaxias. Este análisis genera una deproyección de la imagen de la galaxia a partir de la

cual se obtienen los perfiles azimutales de brillo que tras su descomposición en modos de Fourier nos devuelve los valores de longitud y fuerza de la barra de la galaxia.

Se han estudiado las relaciones entre propiedades de las galaxias y entornos y se incluyen distintas gráficas que representan estas relaciones. En lo que respecta a valores de densidad local de galaxias se observa que las densidades locales de las galaxias de background son menores que aquellas que pertenecen al cúmulo de Virgo. Esto indica que las galaxias catalogadas como de background no han sufrido los efectos de un entorno tan intenso como el cúmulo de Virgo. En el caso de la longitud en kpc de la barra, dentro del cúmulo, galaxias más luminosas poseen barras más largas, esto no ocurre en las galaxias de background. Pero para una luminosidad fija las barras de las galaxias de background son más largas que las que se encuentran en Virgo, apreciándose más el efecto en galaxias menos luminosas (más pequeñas).

Para una luminosidad determinada, el radio que engloba el 90 % de la luz de la galaxia frente a la magnitud absoluta es mayor en galaxias de background que en las galaxias que están en Virgo, lo cual indicaría una dependencia del tamaño de las galaxias con el entorno. Si normalizamos el radio de las barras por el R_{90} desaparece la diferencia existente entre radio de la barra y el entorno. Podemos decir que el entorno no afecta a la longitud de las barras pero si lo hace en el tamaño de las galaxias. La longitud de la barra depende de las propiedades del disco que alberga cada galaxia, siendo las barras mayores para galaxias mayores o más luminosas.

En el caso de la fuerza de las barras si existe una relación con el entorno, encontrándose las barras más fuertes en las galaxias más luminosas. Tomado el rango de luminosidad entre $-19.5 < M_r < -18.5$ (rango en el que tenemos datos completos de las tres zonas de la muestra de galaxias) las galaxias de background son más fuertes que las galaxias que pertenecen al cúmulo. Esta diferencia en la fuerza de las barras podría deberse a que los discos de las galaxias presentes en el cúmulo son más gruesos que los discos de las galaxias de campo.

Palabras clave: galaxia, barra, barrada, Virgo, background, virial, entorno, cúmulo, fourier, luminosidad

Abstract

Starting from the two catalogues of VCC and EVCC make up for the Virgo cluster, 60 barred galaxies of morphological type SB0 and SBa have been analysed . The sample was enlarged with a number of galaxies to study, adding up another group of background galaxies with similar morphological type in the range of absolute magnitudes where there was no galaxies in the catalogue. Initially there was a selection of 174 barred galaxies in both catalogues that were reduced to 60 galaxies. This was because we found some problems in the study or because they own to a different morphological type, so we avoid to introduce bias in the measurements. These galaxies have been divided in three different groups depending on the environment they are staying. With the help of the phase-space diagram the different areas have been determined: galaxies sited in the virialized area of Virgo cluster, the ones that have experimented more intensely the environment of Virgo because they are in the cluster few G years ago; galaxies sited in the infall area, they are member os the cluster that have already felt the cluster environment effect but less intensely , done to the arrival to the cluster at around $\approx 1Gyr$; and the last group the background galaxies or galaxies in the field, they are not sited in the cluster. From de 60 galaxies analysed in the sample, 25 of them own to the virialized area in the classification, 11 to the infall area and 24 of them are in the field.

The mean goal of the study is to analyse if there is a relation between the properties of the bars in the barred galaxies and the environment where the galaxy is sited. Specifically we try to determine if there are differences between the bar length and/or the strength of the bars for the galaxies of similar luminosity inside the Virgo cluster or outside it. These studies have been done in the Virgo cluster environment due to the galaxy type variety and the different star formation status. It is in star formation process and is the closest cluster to the Milky Way, so the observations allow us to distinguish a few kpc structures inside it.

We have realized, for every galaxy in the sample, an analysis of the surface luminosity isophotes obtaining the ellipticity radial profiles and the position

angle of the galactic isophotes. These profiles allow us to know the position angle and the inclination of the galactic disks. This have been done by the ELLIPSE task in the ISOPHOTE package from the image processing program IRAF. Furthermore for the data treatment the programs of PYTHON and IDL of programming language have been used.

The values obtained from the ELLIPSE task will be taken as initial condition to the later analysis of Fourier, where we will study the surface brightness of the galaxies. This analysis generates a de-projection in the galaxy image. From it will be obtained the azimuthal brightness profile that, later on, will be divided into Fourier modes and it will found out the values of the length and strength of the bar of the galaxy.

The relationship between the properties of the galaxies and the environments have been studied, and several plots showing those relations are included in the study. Respecting to the local density values of the galaxies, we observed that local densities of background galaxies are less than those that own to the Virgo cluster. This result show us that the galaxies catalogued as background galaxies have not felt the effects of a so intense environment as the ones placed in the Virgo cluster. In the case of the length of the bar galaxy in kpc, inside the cluster, brighter galaxies have longer bars, this effect does not happen in background galaxies. But for a fixed brightness the bars of the background galaxies are longer than the ones sited at Virgo, seeing this effect in less bright galaxies (smaller ones).

For a determined brightness, the radius taking the 90 % of the light in the galaxy against the absolute magnitude is bigger in the background galaxies than in the galaxies sited inside Virgo. This will suppose a size dependency in the galaxies within the environment. If we normalize the radius of the bars with the R_{90} the difference between the bar radius and the environment disappear. We can conclude that environment does not affect to the length of the bars in the barred galaxies but it affects in the galaxies sizes. The bar length is depending on the properties of the disk of each galaxy itself, being the bars longer for bigger galaxies or brighter galaxies.

In the case of the strength of the bars it is a relationship with the environment, being the stronger bars in the brighter galaxies. If we take the brightness range between $-19.5 < M_r < -18.5$ (range where we have complete data from the three areas of our sample of galaxies) the background galaxies are stronger than the galaxies owning to the Virgo cluster. The difference in the bars strength could be done to the galaxy disks, because the disks in the galaxies sited in the Virgo cluster are thicker than the disks in the galaxies sited in the field.

Keywords: galaxy, bar, barred, Virgo, background, virial, enviroment, cluster, fourier, brightness.

Índice general

Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Galaxias barradas	1
1.2. Entorno y evolución de galaxias: Cúmulos y agrupación de galaxias	3
1.3. Objetivos	5
2. Catálogo de galaxias	6
2.1. Cúmulo de Virgo	6
2.2. Base de datos y muestra de galaxias	7
3. Análisis de galaxias	11
3.1. Análisis fotométrico de galaxias	11
3.2. Análisis de Fourier del perfil azimutal de luminosidad	13
4. Resultados	16
5. Conclusiones	23

Índice de figuras

1.1. <i>Galaxia espiral barrada tipo SBa [3]</i>	2
2.1. <i>Imagen parcial del cúmulo de galaxias de Virgo resultado de sumar 12 exposiciones de 900s en cada uno de los 3 filtros anchos R,G,B más 43 exposiciones de 1.200s en el filtro L. Autor: D. López, IAC. [32]</i>	7
2.2. <i>Comparación de las regiones de observación de ambos catálogos: VCC y EVCC (Kim et al. (2014))</i>	8
2.3. <i>De izquierda a derecha distribución de magnitudes absolutas en la banda r para las galaxias catalogadas como miembros, posible miembros y de background, respectivamente.</i>	9
2.4. <i>Espacio-fase del cúmulo de Virgo. Los puntos verdes y azules indican las galaxias clasificadas como miembros y posibles miembros, respectivamente. La línea roja discontinua divide la zona virializada (debajo) de la zona de infall (arriba; ver Oman et al. 2013).</i>	10
3.1. <i>Ejemplo de la imagen obtenida tras correr la tarea ellipse de IRAF. En rojo se muestran las elipses ajustadas a las isofotas de la galaxia</i>	12
3.2. <i>(panel superior-izquierda) imagen en el filtro r de la galaxia. Perfiles radiales de brillo superficial (panel superior-derecha), elipticidad (panel inferior-izquierda) y ángulo de posición (panel inferior-derecha) de las isofotas de la galaxia. La línea horizontal roja muestra el ajuste realizado en las partes externas de los perfiles radiales de elipticidad y ángulo de posición de las isofotas, para determinar la inclinación y ángulo de posición del disco de la galaxia.</i>	13
3.3. <i>(panel superior-izquierda) imagen en la banda r de la galaxia. (panel superior-central) imagen deproyectada en la banda r de la galaxia. (panel superior-izquierda) representación de la luz de la galaxia en un diagrama en coordenadas polares (R, θ). (panel inferior-izquierda) perfiles radiales de los modos de Fourier 2 (línea continua), 4 (Línea a trazos), y 6 (línea punteada). (panel inferior-central) perfil radial I_b/I_{ib}. La línea horizontal representa el valor $\frac{(I_b/I_{ib})_{max} - (I_b/I_{ib})_{min}}{2} + (I_b/I_{ib})_{min}$ del perfil I_b/I_{ib} y que se usa para determinar el radio de la barra. (panel inferior-derecha) perfil radial del ángulo de phase de Fourier.</i>	14

4.1. Distribución de densidad local de galaxias para las galaxias en Virgo (línea gris), galaxias barradas en las zonas de infall y virializada (rojo) y galaxias barradas de background (azul).	17
4.2. Radio en kpc de las barras medidas frente a su magnitud absoluta en el filtro r . Los puntos rojos y azules representan galaxias clasificadas como miembros y posibles miembros, respectivamente. Las estrellas blancas son las galaxias de background del catálogo y las estrellas negras las galaxias de background tomadas de la literatura [42]. Las líneas negras, rojas y azules representan los ajustes de las galaxias de background, miembros y posible miembros, respectivamente.	18
4.3. Representación de R_{90} en kpc frente a la magnitud absoluta de las galaxias en el filtro r . Los puntos rojos representan galaxias en la zona virializada mientras que los azules en la zona de infall de Virgo, las estrellas blancas son las galaxias de background del catálogo EVCC y las estrellas negras las galaxias de background tomadas de la literatura [42]. Las líneas rojas y negras representan los ajustes lineales realizados para las galaxias del cúmulo (zonas virializadas y de infall) y las de background, respectivamente.	20
4.4. Representación del radio de la barra normalizado por R_{90} frente a la magnitud absoluta en la banda r . El código de color y símbolos es como en las figuras anteriores.	21
4.5. Fuerza de las barras medidas frente a su magnitud absoluta en r . Los puntos rojos representan galaxias en la zona virializada mientras que los azules a la zona de infall, con sus ajustes correspondientes. Las estrellas blancas son las galaxias de background del catálogo EVCC y las estrellas negras son galaxias de background tomadas de la literatura [42].	21
5.1. Imágenes de las 60 galaxias en la banda r analizadas en el estudio tomadas de SDSS Dr16 [45]	25
5.2. Imágenes de las 60 galaxias en la banda r analizadas en el estudio tomadas de SDSS Dr16 [45]	26
5.3. Imágenes de las 60 galaxias en la banda r analizadas en el estudio tomadas de SDSS Dr16 [45]	27

Índice de cuadros

2.1. <i>Número total de galaxias analizadas divididas en los diferentes entornos y tipos morfológicos</i>	10
4.1. <i>Catálogo final de galaxias estudiadas. En la columna final membership: M:miembros, P:posibles miembros, B: background</i>	22

Las galaxias son conjuntos de estrellas, gas, polvo y materia oscura unidas por la fuerza gravitatoria formando los bloques fundamentales del Universo. Se calcula que cerca del 80 % de la materia del universo es materia oscura, pero a día de hoy no está demostrada la naturaleza de esta componente (Zwicky 1933). Otras estructuras menores pueden formar parte de galaxias como nebulosas o cúmulos estelares.

Existen galaxias de múltiples tamaños, desde galaxias enanas conteniendo $\approx 10^7$ estrellas a galaxias gigantes que contienen del orden de 10^{14} . Además las galaxias se clasifican en tres grandes grupos atendiendo a la morfología visual: galaxias elípticas (forma esférica o de elipse y poca formación de estrellas), espirales (discos con un bulbo central, pueden tener barras o brazos y poseen formación estelar) e irregulares (sin forma definida).

La mayoría de las galaxias, debido a la atracción gravitatoria se disponen en grupos denominados cúmulos conectados por zonas llamadas filamentos. Estos grupos a su vez pueden unirse formando estructuras mayores a las que llamamos supercúmulos rodeadas de zonas de vacío. [1]

1.1. Galaxias barradas

El estudio que nos ocupa se centra en las galaxias tipo espiral barradas. Se trata de galaxias espirales en forma de disco con un bulbo central y generalmente brazos, y además con una estructura central en forma de barra formada por estrellas en órbitas elípticas. La presencia de una barra en el disco galáctico rompe la axisimetría del potencial del disco y hace que otros componentes de las galaxias (gas y estrellas) pierdan o ganen momento angular dependiendo del lugar de la galaxia donde se encuentren. Las barras son las estructuras responsables de la evolución secular de los discos galácticos pudiendo llegar a producir importantes transformaciones morfológicas. Así, las barras canalizan el gas hacia el interior de la galaxia, flujo que promueve la formación de estrellas en su interior y alimenta al agujero negro central. [2]

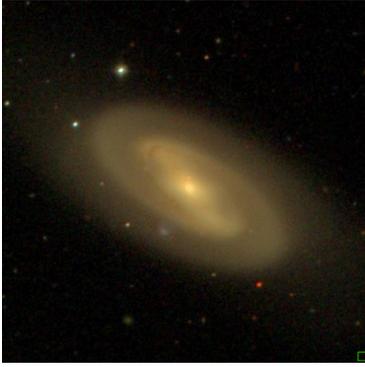


Figura 1.1: *Galaxia espiral barrada tipo SBa [3]*

Las barras son muy comunes en las partes centrales de las galaxias con disco y dirigen la evolución de su estructura. Estudios observacionales muestran que entre un 50 - 70 % de las galaxias con disco presentan una estructura estelar en forma de barra ([4] Eskridge et al. 2000; [5] Aguerri et al. 2009; Masters et al. 2011). Son estructuras muy luminosas pudiendo contener hasta el 30 % de la luz total de la galaxia ([6] Marinova Jogee 2007). Sin embargo, sólo contienen \approx 10 % de la masa de los discos galácticos. Las barras producen cambios estructurales significativos en los discos donde se alojan. Así

pueden generar anillos tanto externos como internos a la barra (ver Buta et al. 1994), modificar los brazos o formar otras estructuras. Estas estructuras son creadas por las barras debido a que redistribuyen muy eficientemente el momento angular entre el disco y las otras componentes galácticas ([7] Debattista & Sellwood 1998; [8] Athanassoula et al. 2013). Varios factores influyen en esta redistribución del momento angular en los discos de las galaxias barradas. Entre ellos podemos mencionar: concentración del halo de materia oscura, contenido de gas de la galaxia; velocidad de dispersión del disco (Debattista & Sellwood 2000; [8] Athanassoula et al. 2013). Este intercambio de momento angular hace que las barras evolucionen con el tiempo hacia estructuras más largas, fuertes y lentas.

Los parámetros que caracterizan una barra son tres: longitud, fuerza y velocidad de rotación o patrón de velocidades. Se han desarrollado diferentes métodos para determinar cada uno de estos parámetros.

La **longitud de la barra** puede determinarse mediante métodos como estimación visual ([10] Martin 1995), localización de la elipticidad máxima de las isofotas ([9] Wozniak et al 2000), descomposición fotométrica de la distribución de la luz en diferentes componentes estructurales ([11] Aguerri et al. 2001), el análisis del brillo superficial de las galaxias mediante descomposición de Fourier ([44] Aguerri et al. 2000). La longitud de la barra está relacionada con otros parámetros de la galaxia como: tamaño, color, prominencia del bulbo o tipo de galaxia. Valores típicos de la longitud de las barras están alrededor de 3-4 kpc siendo más cortas en galaxias más tardías que en tempranas, además las barras son más largas para galaxias más grandes (ver Marinova & Jogee 2007 [6]; [12] Barazza et al. 2008; [5] Aguerri et al. 2009)

La **fuerza de la barra** indica la contribución de esta estructura al potencial total de la galaxia. Puede ser determinada midiendo directamente el torque de la barra ([13] Quillen 2000), o indirectamente mediante la amplitud máxima del modo de Fourier $m = 2$ ([44] Aguerri et al. 2000) o mediante el máximo de la elipticidad de las isofotas galácticas en la zona de la barra ([9] Wozniak

et al. 2000). Este parámetro depende del tipo morfológico de las galaxias. Así, galaxias de tipo temprano presentan barras más débiles que las de tipo tardío ([5] Aguerri et al. 2009).

El **patrón de velocidad** indica la velocidad de rotación de las barras. Éste es el parámetro más difícil de medir y determina la dinámica de la barra. Diversos métodos se han desarrollado para su medida. Podemos mencionar: relación entre anillos y resonancias (ver Buta et al. 1995, 1996), comparación mediante simulaciones de las estructuras producidas por las barras en galaxias individuales (Weiner et al. 2001; [11] Aguerri et al. 2001; [14] Rautiainen & Salo 2008), analizando las líneas de polvo en la zona de la barra ([49] Athanassoula 1992); cambios en el color estelar ([15] Cepa & Beckman 1990; [44] Aguerri et al. 2000). El método más preciso es el denominado método Tremaine & Weinberg (1984; TM) que usa medidas fotométricas y espectroscópicas ([17] Aguerri et al. 2003; [16] Corsini 2007; [46] Cuomo et al. 2021)

El origen de las barras en los discos de galaxias es un tema de debate en la literatura científica. Las barras se pueden crear por causas internas en discos inestables a estructuras tipo barra ([18] Toomre 1964) o bien por causas externas como los efectos de la fuerza de marea originados por la interacción entre galaxias ([19] Martínez-Valpuesta et al. 2016). Poco se conoce acerca del origen de estas estructuras y de la influencia que tiene el entorno en el que viven las galaxias en la evolución de los parámetros de las barras. Este será el objetivo del presente trabajo.

1.2. Entorno y evolución de galaxias: Cúmulos y agrupación de galaxias

En escalas de unos pocos Mpc, las galaxias no se encuentran distribuidas de forma homogénea en el espacio, sino que están en diferentes entornos que van desde grandes vacíos, grupos de unas pocas galaxias hasta asociaciones de centenares o miles de miembros gravitacionalmente ligados. Los grupos y cúmulos de galaxias están formados por materia bariónica (estrellas, gas y polvo) y no bariónica (materia oscura). Todas estas componentes están interaccionando entre sí y ligadas gravitacionalmente.

En el actual escenario de formación de las estructuras en el Universo, los cúmulos de galaxias resultan de la unión de varios grupos menores y galaxias durante un largo periodo de tiempo, que por acreción debido a la fuerza gravitacional viajan a través de los filamentos a zonas más densas. Los cúmulos de galaxias son las mayores y más masivas estructuras virializadas del Universo. Además, son las regiones de más alta densidad de galaxias, siendo por tanto una de las mejores zonas para estudiar el papel que juega el entorno en la formación y evolución de galaxias. Los cúmulos de galaxias sirven también para estudiar los parámetros cosmológicos.

El papel que juega el entorno en la evolución y formación de las galaxias es

un tema de debate en la literatura científica. Esto es debido a que las galaxias que se encuentran en entornos de alta densidad evolucionan mediante unos mecanismos físicos muy diferentes a aquellas que se encuentran aisladas. Entre estos mecanismos algunos de ellos como las interacciones gravitacionales o las fusiones de galaxias ([20] Mihos & Hernquist 1994; [21] Mastropietro et al. 2005; [22] Aguerri & Gonzalez-Garcia 2009) afectan a todas las componentes galácticas (estrellas y gas). Otros mecanismos que afectan a las galaxias en los cúmulos solo afectan a su componente gaseosa. Podemos mencionar los mecanismos de gas-stripping (ver Gunn & Goot 1972; [23] Quilis et al. 2000), strangulation ([25] Larson et al. 1980; [24] Peng et al. 2015) or starvation ([26] Balogh et al. 2000). Todos estos mecanismos producen una pérdida del gas bien frío o caliente de las galaxias presentes en cúmulos. Esto afecta directamente a la parada de la formación estelar y como consecuencia a las propiedades de las poblaciones estelares de las galaxias.

Todos estos mecanismos físicos producen importantes transformaciones en la morfología ([27] Moore et al. 1998; [11] Aguerri et al. 2001, 2004; [28] Lisker et al. 2006), cinemática ([29] Pedraz et al 2002; [30] Toloba et al. 2009; ver Scott et al. 2020) y propiedades de las poblaciones estelares (ver Haines et al. 2006; Smith et al. 2009) de las galaxias situadas en entornos de alta densidad.

En general, los mecanismos anteriormente descritos confieren diferentes propiedades a las galaxias que se encuentran en entornos de alta densidad. Así los cúmulos de galaxias son regiones del Universo dominados por galaxias de tipo temprano mientras que las regiones de densidades menores están dominadas por galaxias de tipo tardío. Esto es lo que se conoce como relación morfología-densidad presente tanto en cúmulos cercanos y a alto redshift ([31] Dressler 1980).

En el presente trabajo queremos entender como el entorno afecta a los parámetros de las barras presentes las galaxias con disco.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección 1.3 se muestran los objetivos del estudio, en la sección 2 se introduce el cúmulo de Virgo en el que se encuentran las galaxias analizadas y se define la muestra de galaxias barradas estudiada, el análisis llevado a cabo se detalla en la sección 3 y finalmente se muestran los resultados y conclusiones en los capítulos 4 y 5 respectivamente.

1.3. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la influencia del entorno en las propiedades de las barras en una muestra de galaxias situadas en el cercano cúmulo de Virgo.

Como objetivos particulares nos proponemos:

- Determinar si existen diferencias en la longitud de la barra para galaxias de similar luminosidad que esten en Virgo y en campo.
- Determinar si hay diferencias en la fuerza de la barra en galaxias de similar luminosidad en Virgo y en campo.

2.1. Cúmulo de Virgo

Como hemos dicho anteriormente, nuestro objetivo principal para el presente trabajo es analizar el papel que juega el entorno en la formación de barras en los discos de las galaxias. Para ello hemos elegido el cúmulo de Virgo. El cúmulo de Virgo es uno más de los 100 millones de cúmulos de galaxias que componen el Universo observable. Es el cúmulo galáctico más rico y grande del universo local, y forma un entorno interesante para el estudio de la población de galaxias, ya que contiene una gran variedad de tipos de galaxias con diversas actividades de formación estelar ([34] Soria et al.(2022)). Presenta una masa total de $1.2 \times 10^{15} M_{\odot}$. Su radio virial es $R_{vir} = 1,72$ Mpc (ver Hoffman et al. 1980). El cúmulo aún no está virializado, encontrándose en pleno proceso de formación mediante la acreción de varios grupos de galaxias, como los conocidos por los nombres de M87, M86 y M49 ([35] Arnaboldi et al. 2004; [43] Aguerri et al. 2005). El cúmulo de Virgo es el más cercano a la Vía Láctea, a una distancia de aproximadamente 18.7 Mpc. Esta cercanía permite realizar estudios como el propuesto en este trabajo, ya que a la distancia de este cúmulo 1 arcsec equivale a 0.09 kpc. Esto nos permite resolver estructuras de unos pocos kpc como son las barras.

El cúmulo de Virgo contiene varios cientos de galaxias, unas 1300 conocidas, y forma la región central del Supercúmulo Local, en el cual también se encuentra el Grupo Local [32]. Las galaxias principales que forman Virgo son elípticas y espirales, encontrándose las primeras más concentradas en el centro. En particular, la región central del cúmulo está dominada por la galaxia elíptica gigante M87. Se considera un cúmulo relativamente joven, puesto que contiene algunos pequeños grupos que se encuentran aún cayendo y evolucionando en la zona de infall. ([37] Kim et al. (2014))

El medio intergaláctico de Virgo contiene gas a altas temperaturas y una gran cantidad de estrellas y nebulosas planetarias, así como regiones de formación estelar ([43] Aguerri et al. 2005).



Figura 2.1: Imagen parcial del cúmulo de galaxias de Virgo resultado de sumar 12 exposiciones de 900s en cada uno de los 3 filtros anchos R,G,B más 43 exposiciones de 1.200s en el filtro L. Autor: D. López, IAC. [32]

2.2. Base de datos y muestra de galaxias

La muestra de galaxias a analizar se obtuvo de dos grandes catálogos confeccionados para este cúmulo: el Virgo Cluster Catalog (VCC) y el Extended Virgo Cluster Catalog (EVCC).

El catálogo VCC fue confeccionado por Binggeli et al. (1985) y está formado por 2096 galaxias distribuidas en aproximadamente un área de ≈ 140 grados² alrededor del centro del cúmulo. Las observaciones para la construcción del catálogo fueron llevadas a cabo entre 1979 y 1982 en el Observatorio de Las Campanas (Chile). En este catálogo se recopila para cada galaxia sus coordenadas, magnitudes, pertenencia al cúmulo o tipo morfológico, entre otros parámetros. Este último determinado por la morfología visual de las galaxias ([33] Sandage et al.(1985)). La pertenencia al cúmulo se divide en tres grupos: miembros para aquellas galaxias sin ambigüedad de pertenencia, posibles miembros para aquellas en las que el criterio de selección no es capaz de asegurar la pertenencia a ninguno de los otros grupos y background las que se encuentran recogidas en Catalog of Galaxies and Clusters of Galaxies (CGCG) ([36] Zwicky et al.(1961-1963)).

El catálogo EVCC es una ampliación del VCC realizada por Kim et al. (2014)

usando datos del cartografiado Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 (SDSS Dr 7) (DR7; [38] Abazajian et al. 2009). Este catálogo cubre un área de 725 grados² o 60.1 Mpc² alrededor del centro del cúmulo. EVCC es 5.2 veces mayor que el catálogo previo VCC y alcanza 3.5 veces el radio Virial. Comprende un total de 1589 galaxias: 1324 seleccionadas por un límite superior de velocidad radial de 3000 km_s⁻¹ determinado por Binggeli et al, y 265 en la región de EVCC tomadas de NASA/IPAC Extragalactic Database (NED). Del número total de galaxias del catálogo 676 no estaban incluidas en el VCC. En este nuevo catálogo la pertenencia al cúmulo se define a partir de medidas de redshift y la clasificación de galaxias se complementa con dos métodos, la clasificación morfológica visual y el color y las características espectroscópicas. ([37] Kim et al.(2014))

En la Figura 2.2 se puede ver las diferencias de campo entre ambos catálogos.

De los catálogos citados anteriormente VCC y EVCC hemos obtenido un total de 2772 galaxias (1183 y 1589 respectivamente). Se hizo una comparación de las galaxias en ambos catálogos para eliminar de la muestra aquellas que están repetidas en ambos. Para ello calculamos la distancia de cada galaxia del catálogo EVCC a las del VCC, consideramos que se trataba de la misma galaxia cuando la distancia entre ambas era menor de 1 arcsec.

Una vez comparados los datos se obtienen 172 galaxias repetidas en ambos catálogos, obteniendo así 2600 galaxias en total (1097 en VCC y 1503 en EVCC), de las cuáles serán seleccionadas para el presente estudio las catalogadas con tipo morfológico como barrada (SB), obteniendo finalmente un catálogo de **174 galaxias barradas**, siendo 48 de ellas del catálogo VCC y las 126 restantes del catálogo extendido EVCC. Además del total de galaxias se tienen 75 miembros, 52 posibles miembros y 47 galaxias de background.

En la figura 2.3 se muestra la distribución de magnitudes absolutas en la banda r para los diferentes grupos de las 174 galaxias de la muestra inicial: miembros, posibles miembros y background.

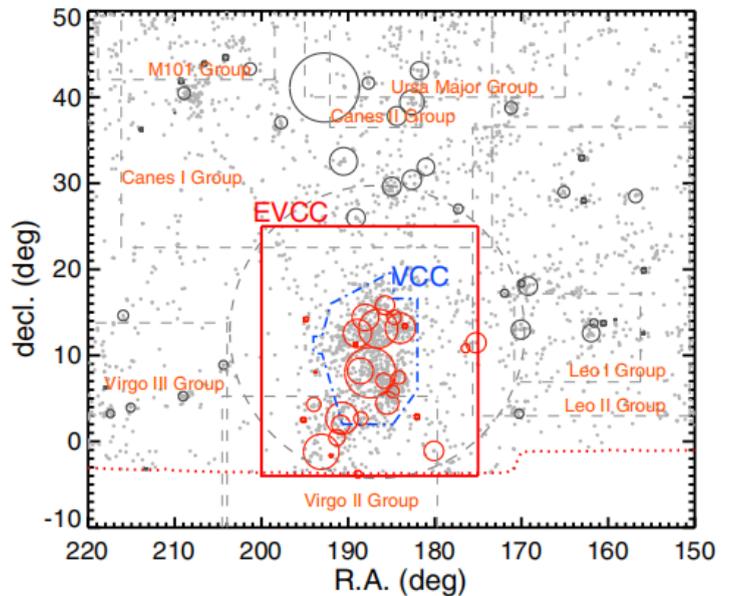


Figura 2.2: Comparación de las regiones de observación de ambos catálogos: VCC y EVCC (Kim et al. (2014))

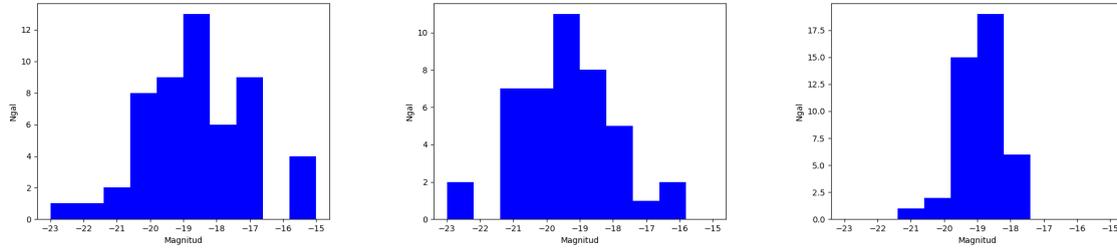


Figura 2.3: De izquierda a derecha distribución de magnitudes absolutas en la banda r para las galaxias catalogadas como miembros, posible miembros y de background, respectivamente.

Durante el proceso algunas galaxias tuvieron que ser eliminadas del análisis por problemas. Una de las galaxias del catálogo no tiene imagen en la base de datos de SDSS, tres de ellas muestran una imagen demasiado inclinada que dificulta el análisis isofotal (inclinaciones por encima de $b/a = 0.6$ siendo a y b los semiejes mayor y menor, $\approx 53^\circ$). Dos de estas últimas junto a otra galaxia poseen formación estelar interna de modo que el bulbo/barra galáctico no se encuentra bien definido su centro. Finalmente dos galaxias de la muestra poseen modos de Fourier $m = 2$ muy suaves, esto implica que a pesar de estar catalogadas visualmente como galaxias barradas fuertes (SB), de existir una barra esta sería débil y/o no estará bien definida.

Finalmente nos restringimos a galaxias de tipos morfológicos SB0 y SBa. Esto nos evita introducir sesgos en la medida de los parametros de las barras debido a diferentes tipos morfológico. Por todo ello, la muestra final y por tanto las galaxias totales analizadas que formarán la estadística final de los resultados son 60 galaxias. La composición de la muestra según el tipo morfológico y la pertenencia al cúmulo queda de la siguiente forma: miembros de Virgo (11 tipo SB0 y 14 tipo SBa), posibles miembros del cúmulo (3 tipo SB0 y 8 tipo SBa) y galaxias de background (8 tipo SB0 y 16 tipo SBa). (Ver tabla 2.1) En las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran las imágenes de las galaxias estudiadas.

En la figura 2.4 se visualiza la posición de las galaxias en el diagrama espacio-fase del cúmulo de Virgo, destacando en verde las galaxias clasificadas como miembros y en azul las galaxias clasificadas como posibles miembros. Las galaxias de background quedan fuera de este diagrama espacio-fase ya que su velocidad de recedison dista varias σ 's de la velocidad de recesión del cúmulo. En la figura del espacio fase dibujamos una línea discontinua roja que nos marca la separación entre la zona virializada del cúmulo en la cual las galaxias pueden llevar varios Gyr desde su caída a Virgo, y la zona de infall

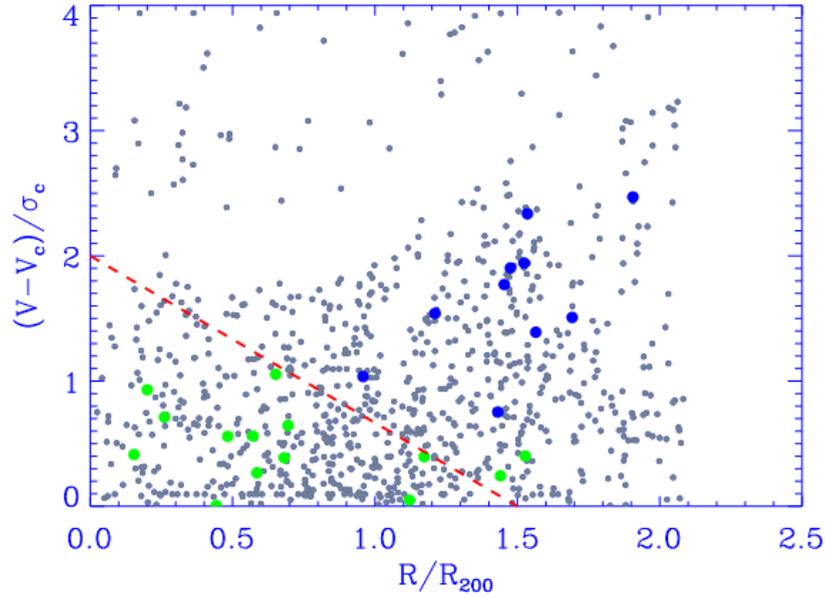


Figura 2.4: *Espacio-fase del cúmulo de Virgo. Los puntos verdes y azules indican las galaxias clasificadas como miembros y posibles miembros, respectivamente. La línea roja discontinua divide la zona virializada (debajo) de la zona de infall (arriba; ver Oman et al. 2013).*

	Tipo SB0	Tipo SBa
Zona virial	11	14
Zona infall	3	8
Background	8	16
Total tipos	22	38
Total		60

Cuadro 2.1: *Número total de galaxias analizadas divididas en los diferentes entornos y tipos morfológicos*

la cual esta poblada por galaxias que han llegado al cúmulo hace ≈ 1 Gyr (ver Oman et al. 2013). Notar que las galaxias clasificadas como miembros están prácticamente todas en la zona virializada. Por el contrario, las clasificadas como posibles miembros estan en la región de infall. **Por ello de ahora en adelante nos referiremos indistintamente a galaxias miembros o virializadas y posibles miembros o de infall.**

Para la construcción de la grafica del espacio-fase hemos usado $H_0=70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_0=0.3$, la velocidad de dispersión de $\sigma_c = 638 \text{ km s}^{-1}$ ([39] Kashi-badze et al.(2020)), velocidad de virgo $V_c = 1307,09 \text{ km s}^{-1}$ ([40]), y $r_{200}=1.55 \text{ Mpc}$ ([41]) (radio dentro del cual la densidad media de la materia encerrada es 200 veces la densidad crítica). Además, se ha tomado el centro del cúmulo de Virgo en (RA,DEC) = (187.697,12.337).

Análisis de galaxias

Para alcanzar el objetivo del presente trabajo tenemos que determinar los parámetros longitud y fuerza de las barras de las galaxias seleccionadas. Estos parámetros serán determinados usando el método de análisis de Fourier de su brillo superficial desarrollado por Aguerri et al. 2000 [44]. Previo a la aplicación de dicho método tenemos que conocer la inclinación y el ángulo de posición de las galaxias. Para ello hemos realizado un análisis de las isofotas de brillo superficial de los objetos seleccionados

3.1. Análisis fotométrico de galaxias

Con el nuevo catálogo de galaxias barradas seleccionadas para el estudio se procede a la descarga de imágenes desde SDSS Dr16 [45] a partir de sus coordenadas. En este punto teniendo en cuenta las galaxias descartadas tal como se ha indicado en la sección 2.2 tenemos **60 galaxias finales en el estudio. Para todas ellas nos descargamos las imágenes en la banda r.**

El análisis fotométrico individual de cada galaxia será llevado a cabo gracias a la tarea ELLIPSE dentro del paquete ISOPHOTE del programa IRAF, que ajusta isofotas elípticas a las curvas de brillo superficial constante de las galaxias. A partir de estos ajustes obtenemos los perfiles radiales de brillo superficial, elipticidad y ángulo de posición de las isofotas. Estos perfiles nos sirven para determinar la inclinación y el ángulo de posición de los discos galácticos mediante el ajuste a grandes radios de la elipticidad y el ángulo de posición de las isofotas, respectivamente. Además, las diferentes componentes estructurales que forman las galaxias dejan sus huellas en estos perfiles isofotales. Así, la presencia de una barra en los discos galácticos produce un máximo en el perfil de elipticidad y una constancia del ángulo de posición de las isofotas en la zona de la barra (ver Aguerri et al. 2000; ver Figura 3.2). Así, el análisis de estos perfiles isofotales nos sirven para confirmar la presencia de barras en las galaxias seleccionadas.

El programa ELLIPSE para el ajuste de las isofotas necesita tener unos valores iniciales de los parámetros a ajustar en cada una de las galaxias. Para

ello, le proporcionaremos el valor del centro de la galaxia y unos valores iniciales para la elipticidad y el ángulo de posición de las isofotas. Para realizar un buen ajuste del brillo superficial de las galaxias es muy importante enmascarar todos los objetos del campo que no pertenezcan a la galaxia, como pueden ser estrellas o galaxias cercanas a fin de que las isofotas de la galaxia no estén contaminadas con luz externa a la misma.

Una vez ha finalizada la tarea ELLIPSE se obtiene una tabla con ciertos parámetros en función del radio, los que más interesan son los perfiles radiales de la elipticidad y el ángulo de posición. Esta tabla no se encuentra en formato usual, de modo que gracias a la tarea TDUMP de IRAF se convierte a formato ascii o csv para el tratamiento de datos mediante cualquier otro software. El ajuste de las isofotas nos devuelve una imagen del tipo 3.1.

El orden seguido para el análisis de las galaxias es por tipo morfológico y grupo, comenzando el estudio por las galaxias del tipo SB0: miembros, posibles miembros y background; tras este se continuó por las tipo SBa siguiendo el mismo orden.

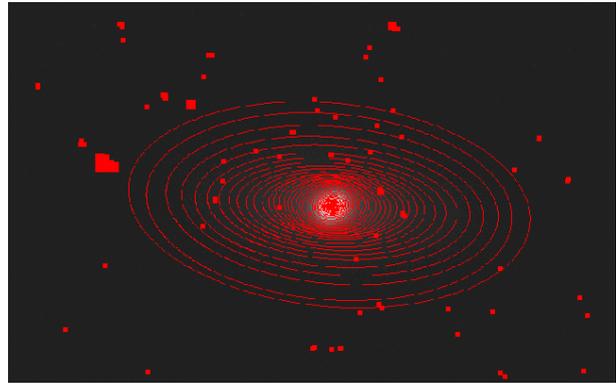


Figura 3.1: Ejemplo de la imagen obtenida tras correr la tarea ellipse de IRAF.

En rojo se muestran las elipses ajustadas a las isofotas de la galaxia

A partir de la tabla de valores obtenida de la tarea ELLIPSE, generamos un programa en PYTHON. Este programa produce una figura por galaxia como la que se muestra en la Figura 3.2. En ella se muestra la imagen en el filtro r de la galaxia sobre la que hemos obtenido las isofotas y los perfiles radiales de brillo superficial (no calibrado), elipticidad y ángulo de posición de las isofotas. Sobre los perfiles de elipticidad y ángulo de posición ajustamos las partes externas de dichos perfiles para obtener la inclinación y el ángulo de posición de los discos de las galaxias. La inclinación la obtuvimos asumiendo que el disco es infinitamente fino mediante la expresión $i = \arccos(1 - \epsilon_d)$ donde ϵ_d es el ajuste de la elipticidad. Estos valores de la inclinación y el ángulo de posición de los discos de las galaxias se usarán en el análisis de Fourier del brillo superficial de las galaxias. Tanto estos como los parámetros conocidos y medidos de todas las galaxias que han formado parte del estudio se dan en la tabla 4.1.

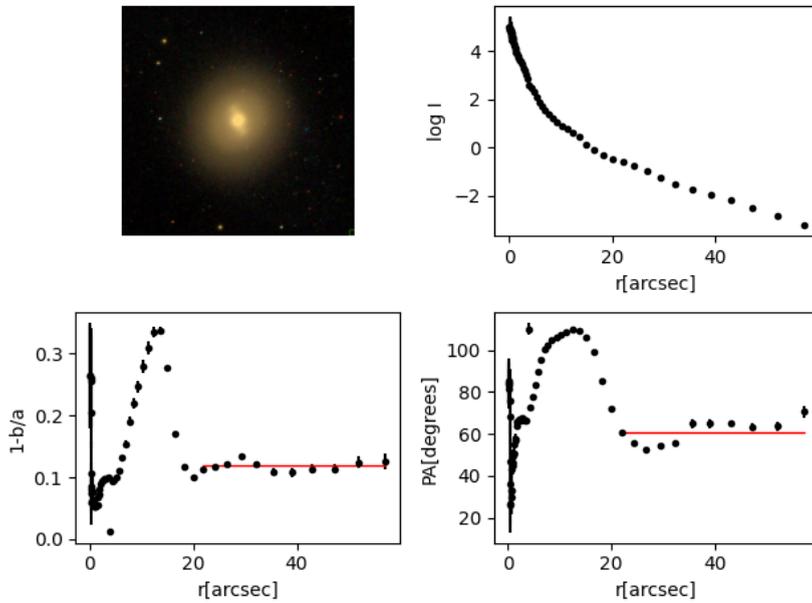


Figura 3.2: (panel superior-izquierda) imagen en el filtro r de la galaxia. Perfiles radiales de brillo superficial (panel superior-derecha), elipticidad (panel inferior-izquierda) y ángulo de posición (panel inferior-derecha) de las isofotas de la galaxia. La línea horizontal roja muestra el ajuste realizado en las partes externas de los perfiles radiales de elipticidad y ángulo de posición de las isofotas, para determinar la inclinación y ángulo de posición del disco de la galaxia.

3.2. Análisis de Fourier del perfil azimutal de luminosidad

Con ayuda de las gráficas anteriores se procede a la determinación de los parámetros complementando este análisis con un análisis de Fourier de los perfiles azimutales de brillo superficial de las galaxias. A partir de un programa desarrollado en el lenguaje de programación de IDL y partiendo de los datos anteriores se determinarán la longitud y la fuerza de la barra. [5]

Antes de hacer el análisis de Fourier, se realizó una deproyección de la imagen de la galaxia, de esta forma obtenemos una imagen tipo face-on de la galaxia y sobre ella obtendremos los perfiles azimutales de brillo superficial para realizar la decomposición de Fourier de dichos perfiles. En este caso, los parámetros iniciales que se le proporcionan al programa son: la imagen, el valor del centro de la galaxia, la inclinación y ángulo de posición estimados, y los valores aproximados del radio de la barra y del disco. Estos últimos parámetros se irán variando dependiendo del tipo de galaxia para ajustar los valores de forma óptima para el ajuste. Por ejemplo, en algunos casos hay que

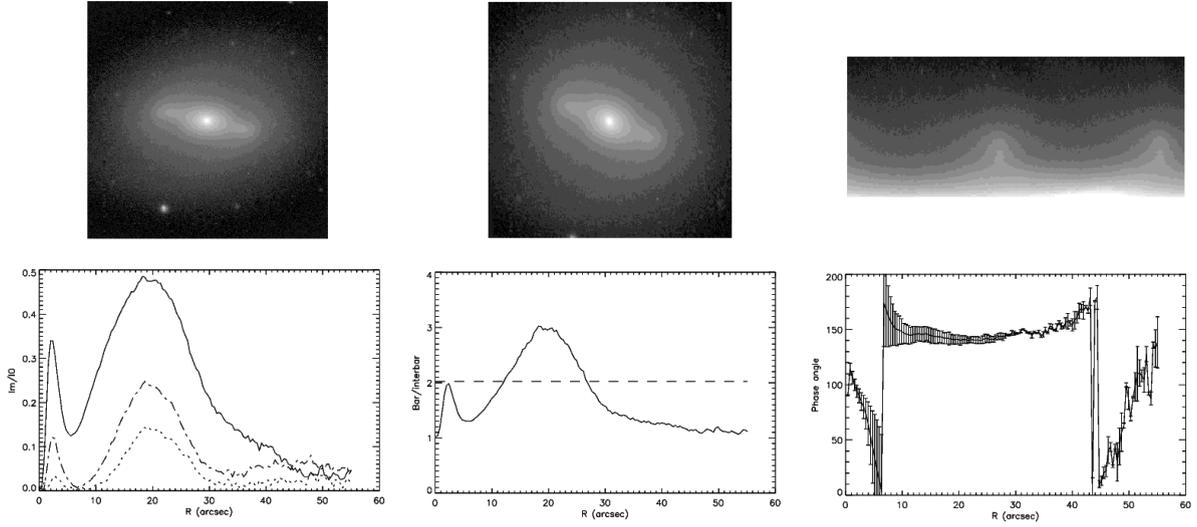


Figura 3.3: (panel superior-izquierda) imagen en la banda r de la galaxia. (panel superior-central) imagen deproyectada en la banda r de la galaxia. (panel superior-derecha) representacion de la luz de la galaxia en un diagrama en coordenadas polares (R, θ) . (panel inferior-izquierda) perfiles radiales de los modos de Fourier 2 (linea continua), 4 (Linea a trazos), y 6 (linea punteada). (panel inferior-central) perfil radial I_b/I_{ib} . La linea horizontal representa el valor $\frac{(I_b/I_{ib})_{max} - (I_b/I_{ib})_{min}}{2} + (I_b/I_{ib})_{min}$ del perfil I_b/I_{ib} y que se usa para determinar el radio de la barra. (panel inferior-derecha) perfil radial del ángulo de phase de Fourier.

recortar parte del disco si en la imagen aparece una estrella.

Los perfiles azimutales de brillo ($I(r, \theta)$), que se obtienen de la imagen de la galaxia face-on son descompuestos en una serie de Fourier de la forma:

$$I(r, \theta) = A_0(r)/2 + \Sigma A_m(r) \times \cos(m\theta) + \Sigma B_m(r) \times \sin(m\theta) \quad (3.1)$$

donde los coeficientes de Fourier $A_m(r)$ and $B_m(r)$ vienen dados por

$$A_m(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(r, \theta) \cos(m\theta) d\theta \quad (3.2)$$

y

$$B_m(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(r, \theta) \sin(m\theta) d\theta \quad (3.3)$$

Los modos de Fourier ($I_m(r)$) se definen por las ecuaciones:

$$I_0(r) = A_0(r)/2. \quad (3.4)$$

y

$$I_m(r) = (A_m^2(r) + B_m^2(r))^{1/2} \quad (3.5)$$

En la Figura 3.3 mostramos las amplitudes de Fourier I_m/I_0 en funcion del radio para varios valores de m para una de las galaxias analizadas. La presencia de una barra en las galaxias produce que los modos de Fourier pares sean prominentes (especialmente el modo $m = 2$). Por el contrario los modos impares son pequeños comparables con cero. En la Figura 3.3 se puede ver ese comportamiento de los modos de Fourier. Además, en la zona de la barra se observa una constancia del ángulo de fase de Fourier.

A partir de los modos pares de Fourier podemos definir dos perfiles que se denominan barra ($I_b(r)$) e interbarra ($I_{ib}(r)$) definimos por: $I_b(r) = I_0(r) + I_2(r) + I_4(r) + I_6(r)$ y $I_{ib}(r) = I_0(r) - I_2(r) + I_4(r) - I_6(r)$. Aguerri et al. (2000) [44] diseñaron un método para determinar el radio de la barra usando los perfiles I_b e I_{ib} . Así el radio de la barra (R_b) es definido como el radio para el cual

$$I_b/I_{ib} = \frac{(I_b/I_{ib})_{max} - (I_b/I_{ib})_{min}}{2} + (I_b/I_{ib})_{min} \quad (3.6)$$

Usando los modos de Fourier tambien podemos obtener una aproximación de la fuerza de las barras (S_b) mediante el maximo del modo 2.

Los valores del radio y de la fuerza de la barra, así como los parámetros conocidos y medidos de todas las galaxias que han formado parte del estudio se dan en la tabla 4.1.

4

Resultados

De la muestra final de 60 galaxias se obtienen los parámetros buscados de longitud y fuerza de la barra y se genera la estadística con el fin de estudiar sus variaciones en distintos entornos de galaxias.

Se deben tener en cuenta las distintas variables que pueden afectar a las propiedades de las galaxias en el estudio que nos ocupa. Así, la longitud de la barra esta directamente relacionada con el tamaño de la galaxia y por tanto con su luminosidad ([5] Aguerri et al.(2009)). Esto lo debemos tener presente ya que las 60 galaxias seleccionadas se expanden en un rango amplio de magnitudes.

Como se ha visto en la figura 2.4 la muestra de galaxias se localiza en varias regiones del espacio fase. Vamos a dividir la muestra de 60 galaxias analizadas según su posición en el espacio fase. Así tendremos 25 galaxias que se encuentran en la zona virializada del cúmulo. Estas galaxias serán aquellas que hayan caído al cúmulo hace varios Gyr. 11 galaxias están situadas en la zona de infall. Estas galaxias son las que están cayendo al cúmulo o han llegado hace $\approx 1Gyr$. Las galaxias de campo, son un total de 24 y son aquellas galaxias que por sus velocidades de recesión no son miembros del cúmulo. Con el fin de tener una segunda variable que nos mida el entorno en el cual se encuentran las galaxias hemos calculado la densidad local de galaxias en la que se encuentra cada una de las 60 galaxias analizadas. Para ello nos hemos descargado todas las galaxias de SDSS-DR16 en un radio de 10 grados alrededor del centro de Virgo.

Se ha generado un script que calcula para cada galaxia la distancia a las cinco galaxias más cercanas de su entorno y con velocidades $\pm 1500 \text{ km s}^{-1}$, calculando su densidad como $\Sigma_5 = 5/\pi \cdot r_5^2$, siendo r_5 la distancia a la quinta galaxia vecina más cercana y con el rango de velocidades indicado.

La distribución de densidad para los distintos grupos de galaxias está reflejada en la figura 4.1. Se observa que las galaxias que son miembros de Virgo están situadas en un rango de densidades entre $1 < \log(\Sigma_5) < 4$. En densidades similares se encuentran las galaxias barradas analizadas y localizadas en las zonas de infall o virializada de Virgo. Por el contrario, casi todas las galaxias de background presentan densidades locales de galaxias menores a las que tienen las galaxias de Virgo. Esta densidad local nos refleja que las galaxias

barradas seleccionadas como de background están situadas en entornos de más baja densidad que las galaxias que están en Virgo.

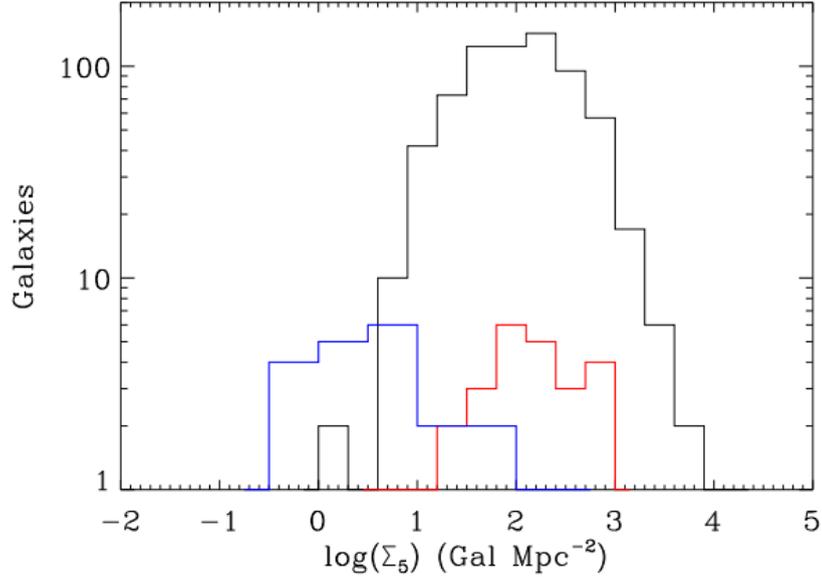


Figura 4.1: *Distribución de densidad local de galaxias para las galaxias en Virgo (línea gris), galaxias barradas en las zonas de infall y virializada (rojo) y galaxias barradas de background (azul).*

La Figura 2.3 muestra que las galaxias barradas de background presentan un rango estrecho de magnitudes. Por el contrario, las galaxias barradas en las zonas virializadas o de infall tienen un rango mayor. En particular, hay una carencia de galaxias brillantes de background entre las galaxias barradas seleccionadas. Con el fin de ampliar la muestra de galaxias de background a magnitudes que no están cubiertas y entender su comportamiento se ha añadido de una muestra de galaxias barradas de background y de tipos morfológicos SB0 y SBa de la literatura. Estas galaxias se han obtenido de los trabajos de de Aguerri et al.(2003, 2015) [42]. El motivo de esta selección ha sido el hecho de que los parámetros de las barras se han obtenido siguiendo la misma metodología que en el presente trabajo. Este conjunto de galaxias formarán parte del grupo de galaxias barradas de background.

En la figura 4.2 se representa la longitud de la barra en kpc frente a la magnitud absoluta para las galaxias barradas analizadas. Para las galaxias barradas en la zona virializada y de infall de Virgo hay una correlación entre el radio de la barra y la magnitud absoluta de las galaxias. Así, galaxias más luminosas presentan barras más largas. Sin embargo, esta correlación no se muestra para las galaxias de background. Por otra parte, para una luminosidad dada las galaxias de background presentan barras más largas que las que están en Virgo. Esta diferencia en longitud es más notable para galaxias

de menor magnitud absoluta. Esta figura indicaría una fuerte dependencia entre el entorno y los parámetros de las barras.

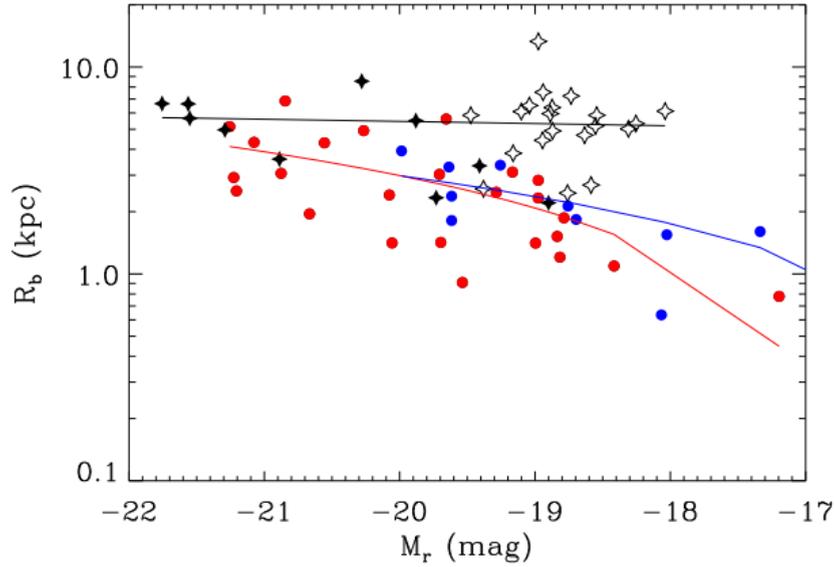


Figura 4.2: Radio en kpc de las barras medidas frente a su magnitud absoluta en el filtro r. Los puntos rojos y azules representan galaxias clasificadas como miembros y posibles miembros, respectivamente. Las estrellas blancas son las galaxias de background del catálogo y las estrellas negras las galaxias de background tomadas de la literatura [42]. Las líneas negras, rojas y azules representan los ajustes de las galaxias de background, miembros y posible miembros, respectivamente.

En la figura 4.3 se ha representado el radio que engloba el 90% de la luminosidad de las galaxias (R_{90} ; obtenido de SDSS [45]) frente a su magnitud absoluta en el filtro r. Se ajustan por un lado las galaxias de background y por otro las galaxias del cúmulo. Se ve una clara diferencia entre las longitudes de ambos grupos de galaxias. Así para una luminosidad determinada las galaxias de background son más grandes que las galaxias que se encuentran en el cúmulo. Es decir, el entorno influye en el tamaño de las galaxias. Esta influencia del entorno en el tamaño de los discos de galaxias ya se ha visto anteriormente en trabajos realizados en otros cúmulos como el de Coma (ver Gutierrez et al. 2004; [43] Aguerri et al. 2005).

En la Figura 4.4 se muestra el radio de la barra normalizado por el tamaño de las galaxias (R_b/R_{90}) en función de su magnitud absoluta en r. En esta figura se puede apreciar que desaparecen las diferencias en el tamaño de las barras que existían antes entre las galaxias de Virgo y las de background. Es decir, las barras de las galaxias de Virgo son más cortas debido a que las galaxias lo son. Esto indica que el entorno no influye en las longitudes de las barras. Las barras crecen en los discos hasta un radio determinado de la galaxia que no

depende del entorno en el que estén. Se puede considerar que el radio de la barra depende de las propiedades internas de los discos de las galaxias y no de su entorno.

Este resultado obtenido aquí está de acuerdo con los obtenidos en simulaciones numéricas de formación de barras por interacciones de galaxias ([19] Martínez-Valpuesta et al. 2016). Según estos trabajos los parámetros de las barras que crecen en discos inestables a inestabilidades tipo barra no varían cuando a las galaxias se les somete a una fuerte interacción gravitatoria debida al paso de una galaxia cercana. Es decir, que los parámetros de las barras vienen fijados por las propiedades del disco donde crecen. Esto es lo mismo que encontramos aquí. Las galaxias barradas de Virgo que viven en un entorno en el cual han podido sufrir interacciones gravitatorias con otras galaxias y con el potencial del cúmulo, presentan unas longitudes de barras normalizadas al tamaño de los discos similares a las galaxias que están en entornos mucho más débiles. Lo que si está claro que se ve afectado son las partes externas de las galaxias perdiendo estrellas y haciendo que sean en Virgo menores. Este hecho también se ve en simulaciones de interacciones de galaxias tipo disco en las cuales las galaxias tras varias interacciones fuertes pierden masa de las partes externas del disco y se pueden incluso llegar a convertir en galaxias enanas si estas interacciones son persistentes y fuertes (ver Aguerri Gonzalez-Garcia 2009).

Por otro lado se ha calculado la fuerza de la barra de cada galaxia a partir del máximo del modo de Fourier $m=2$ y los resultados se incluyen en la gráfica 4.5 en relación a la magnitud absoluta. Para este parámetro no tenemos datos para todas las galaxias de background de la literatura. Por ello sólo podemos comparar la fuerza de la barra para las galaxias de background obtenidas del catalogo EVCC y las de Virgo. Esto hace que tengamos que restringir la comparación a un rango de magnitudes ($-19,5 < M_r < -18,5$). En primer lugar, la Figura 4.5 muestra una clara tendencia en la fuerza de la barra, estando las barras más fuertes en galaxias más luminosas. Si nos restringimos al intervalo de magnitudes anteriormente mencionado las galaxias de campo tienen barras más fuertes que las que se encuentran en el cúmulo.

Una explicación a este último resultado podría deberse a que los discos de las galaxias de una misma luminosidad son más gruesos en el cúmulo de Virgo que en las galaxias de background. Esto es debido a que las interacciones entre las galaxias y con el potencial del cúmulo son muy eficientes para producir calentamiento en los discos (ver Aguerri & Gonzalez-Garcia 2009). El calentamiento de los discos en entornos de alta densidad de galaxias como el cúmulo de Coma han sido también propuesto para explicar la evolución de la fracción de barras como función de la masa/luminosidad de las galaxias (ver Méndez-Abreu et al. 2010). En el cúmulo de Coma se observa que la fracción de galaxias barradas decrece drásticamente en galaxias de baja masa. El hecho de que encontremos entre las galaxias del cúmulo una fuerte dependencia entre la fuerza de la barra y la luminosidad de las galaxias puede reforzar el

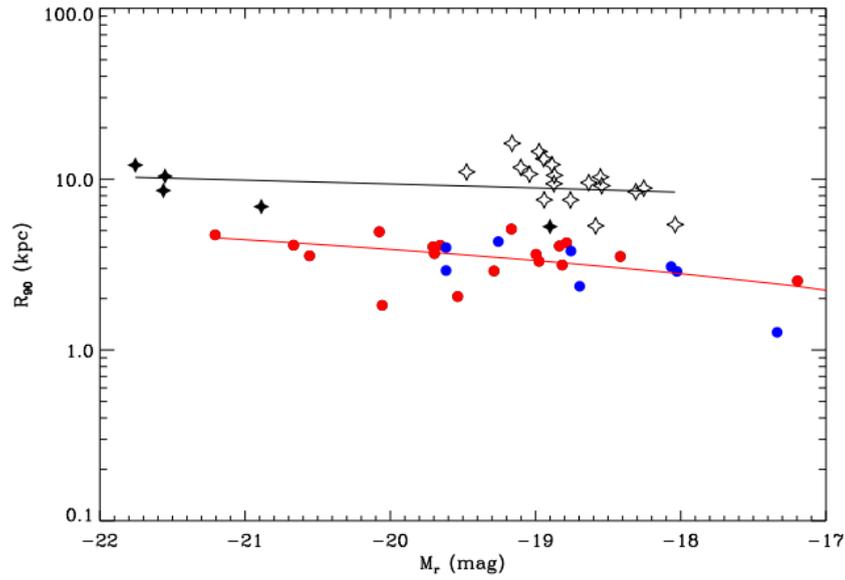


Figura 4.3: Representación de R_{90} en kpc frente a la magnitud absoluta de las galaxias en el filtro r. Los puntos rojos representan galaxias en la zona virializada mientras que los azules en la zona de infall de Virgo, las estrellas blancas son las galaxias de background del catálogo EVCC y las estrellas negras las galaxias de background tomadas de la literatura [42]. Las líneas rojas y negras representan los ajustes lineales realizados para las galaxias del cúmulo (zonas virializadas y de infall) y las de background, respectivamente.

hecho de que son en las galaxias menos luminosas las que son más afectadas por el entorno. Sería conveniente tener la fuerza de las barras en alguna galaxia más luminosa de la literatura para confirmar esta dependencia entre la fuerza de la barra y el entorno.

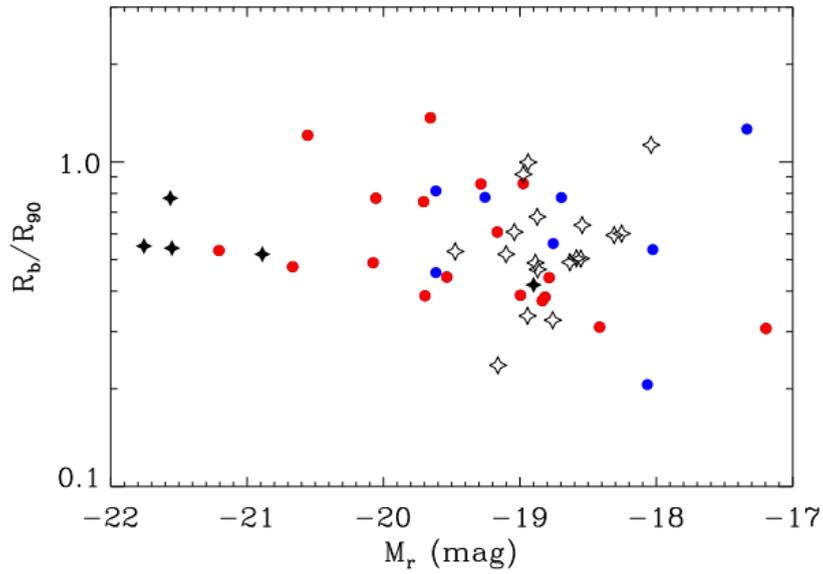


Figura 4.4: Representación del radio de la barra normalizado por R_{90} frente a la magnitud absoluta en la banda r . El código de color y símbolos es como en las figuras anteriores.

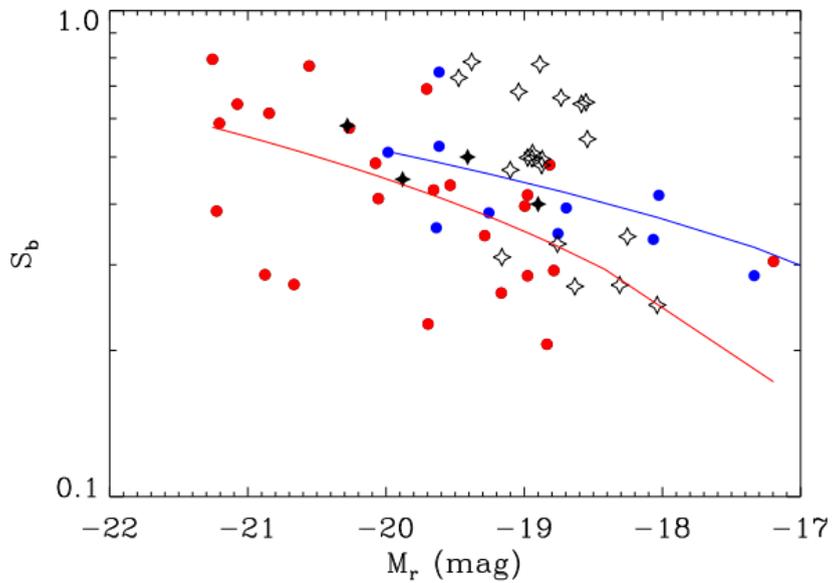


Figura 4.5: Fuerza de las barras medidas frente a su magnitud absoluta en r . Los puntos rojos representan galaxias en la zona virializada mientras que los azules a la zona de infall, con sus ajustes correspondientes. Las estrellas blancas son las galaxias de background del catálogo EVCC y las estrellas negras son galaxias de background tomadas de la literatura [42].

frame SDSS	RA	DEC	velocidad(km/s)	m _r (mag)	$c_{f,SDSS}$	$P_{A,SDSS}$	$R_r(\text{arcsec})$	$\Delta R_r(\text{arcsec})$	S_b	tipo	membership
frame-r-003836-4-0240.fits	184.9386	12.7982	949.5	10.69	0.079	33.42	21.68	0.17	0.27	SBO	M
frame-r-003631-5-0463.fits	186.7606	15.4616	1554.2	11.28	0.30	102.34	26.75	0.26	0.49	SBO	M
frame-r-003836-6-0258.fits	187.5786	13.5777	852.9	12.38	0.061	109.25	31.49	0.30	0.42	SBO	M
frame-r-003903-1-0044.fits	187.6693	9.0157	895.1	12.07	0.45	150.78	27.57	0.17	0.34	SBO	M
frame-r-003903-4-0046.fits	188.0592	10.2515	1270.1	12.94	0.14	60.49	12.14	3.44	0.096	SBO	M
frame-r-003805-1-0039.fits	193.0726	11.3143	1316.1	12.28	0.49	109.60	48.079	0.68	0.68	SBO	M
frame-r-004381-3-0094.fits	184.8774	14.8776	nan	11.3	0.12	60.98	15.69	0.39	0.41	SBO	M
frame-r-005382-2-0032.fits	185.8974	16.722	nan	11.09	0.31	1.76	54.72	1.26	0.57	SBO	M
frame-r-003804-2-0190.fits	186.2305	11.7042	nan	10.51	0.50	0.58	76.19	1.05	0.61	SBO	M
frame-r-003804-5-0194.fits	186.9187	13.0784	nan	10.48	0.29	100.26	34.03	0.37	0.29	SBO	M
frame-r-003804-1-0205.fits	188.5253	11.3212	nan	11.82	0.42	95.46	10.09	4.89	0.44	SBO	M
frame-r-003841-4-0130.fits	184.282	7.6243	2290.1	11.74	0.57	86.12	26.40	0.36	0.75	SBO	P
frame-r-003841-6-0168.fits	190.0498	8.3837	1968.1	12.6	0.22	23.59	23.65	0.15	0.35	SBO	P
frame-r-002126-5-0442.fits	185.4041	5.7658	2436.9	13.33	0.47	-26.97	17.19	1.07	0.42	SBO	P
frame-r-003836-3-0240.fits	184.8508	12.3014	7898.6	16.36	0.08	43.43	8.35	8.32	0.49	SBO	P
frame-r-003842-1-0029.fits	185.3683	6.6536	nan	15.21	0.41	107.36	16.16	0.10	0.43	SBOpec	B
frame-r-003031-5-0434.fits	185.44	10.5958	7943.8	16.43	0.37	111.84	11.18	1.18	0.78	SBO	B
frame-r-003842-3-0037.fits	186.5855	7.4601	7468.4	16.24	0.42	44.91	15.06	0.97	0.51	SBO	B
frame-r-003903-1-0038.fits	186.7467	8.9587	7320.2	16.55	0.48	34.84	5.47	0.71	0.64	SBO	B
frame-r-003031-3-0443.fits	186.8071	9.7085	7362.4	17.11	0.055	155.06	12.37	4.21	0.25	SBO	B
frame-r-003631-1-0465.fits	187.0522	13.8993	7181.2	16.46	0.25	36.39	9.70	3.08	0.27	SBO	B
frame-r-003842-4-0048.fits	188.299	7.8516	6552.7	15.85	0.51	90.57	14.76	0.68	0.68	SBO	B
frame-r-003841-3-0138.fits	185.5517	7.1443	1054.6	12.57	0.51	178.15	20.74	2.76	0.29	SBA	M
frame-r-005225-2-0141.fits	185.8741	19.4267	1051.3	12.36	0.42	73.73	15.67	0.81	0.39	SBA	M
frame-r-003836-4-0253.fits	186.8056	12.7348	1900.7	11.7	0.55	118.88	62.29	2.98	0.43	SBA	M
frame-r-003836-1-0260.fits	187.8856	11.6247	1043.7	12.19	0.47	149.66	34.49	1.09	0.26	SBA	M
frame-r-003631-3-0473.fits	188.2814	14.5749	951.0	12.54	0.52	95.82	13.39	7.13	0.48	SBA	M
frame-r-003903-4-0059.fits	189.9831	10.1762	1979.3	10.15	0.21	24.58	27.97	0.11	0.59	SBA	M
frame-r-003805-5-0022.fits	190.4973	12.9429	1136.9	12.52	0.14	123.37	16.87	2.93	0.21	SBA	M
frame-r-003063-3-0047.fits	186.9732	12.2833	nan	11.65	0.28	-4.15	33.64	1.17	0.69	SBA	M
frame-r-003836-6-0257.fits	187.5093	13.6362	nan	10.13	0.062	164.43	32.49	0.17	0.39	SBA	M
frame-r-003063-1-0052.fits	187.7383	11.4831	nan	12.38	0.48	55.03	25.87	2.48	0.28	SBA	M
frame-r-003031-4-0466.fits	190.3052	10.1557	nan	10.8	0.18	25.59	47.79	1.71	0.77	SBA	M
frame-r-001458-2-0441.fits	190.8333	1.9795	nan	10.1	0.20	-42.41	57.23	5.49	0.79	SBA	M
frame-r-003031-6-0482.fits	192.7782	10.9121	nan	11.66	0.059	26.21	15.78	0.30	0.23	SBA	M
frame-r-002126-6-0437.fits	184.7523	6.0946	1462.2	14.16	0.35	159.71	8.65	0.16	0.30	SBA	M
frame-r-002126-6-0438.fits	184.8434	6.0996	1787.1	11.37	0.63	-31.63	43.68	3.39	0.31	SBA	P
frame-r-002247-6-0161.fits	184.899	5.8468	2521.2	12.66	0.19	34.51	20.37	0.67	0.39	SBA	P
frame-r-002247-3-0164.fits	185.3186	4.5958	2269.3	12.1	0.15	-60.28	37.27	1.35	0.38	SBA	P
frame-r-003842-5-0084.fits	193.6832	8.0531	2546.4	14.02	0.39	-26.78	17.79	0.54	0.28	SBA	P
frame-r-003842-5-0084_1.fits	193.7619	8.0656	2797.9	11.74	0.29	28.09	20.14	0.95	0.53	SBA	P
frame-r-003841-5-0206.fits	195.7545	7.8522	2883.2	15.4	0.43	80.94	11.52	0.42	0.28	SBA	P
frame-r-001231-5-0120.fits	187.2116	-1.9396	nan	11.72	0.093	120.61	36.51	6.19	0.36	SBA	P
frame-r-002126-4-0439_1.fits	185.0195	5.3413	2194.0	13.29	0.27	29.44	7.042	0.29	0.34	SBA	P
frame-r-006781-2-0127.fits	182.2152	9.1316	8172.0	16.62	0.21	101.08	4.49	0.67	0.33	SBA	B
frame-r-003804-3-0165.fits	182.4348	12.1258	8643.3	16.96	0.47	40.62	10.12	0.09	0.54	SBA(s)	B
frame-r-003631-2-0445.fits	184.0111	14.1894	7614.3	16.67	0.19	172.44	10.15	0.26	0.65	SBA	B
frame-r-003836-1-0234.fits	184.0172	11.5348	8042.4	17.09	0.31	106.07	9.89	1.36	0.34	SBA(smooth)	B
frame-r-003903-2-0025.fits	184.887	9.4142	7445.3	16.3	0.55	30.07	12.74	0.25	0.48	SBA(r)	B
frame-r-002247-6-0167.fits	185.8429	6.0408	7024.0	15.37	0.067	63.19	12.37	0.14	0.73	SBA(s)	B
frame-r-003842-3-0032.fits	185.8494	7.4733	4273.6	14.57	0.56	43.42	8.88	0.64	0.79	SBA(s)	B
frame-r-003031-1-0439.fits	186.2042	8.8004	7199.4	16.79	0.072	172.72	10.38	0.63	0.27	SBA(r)	B
frame-r-004381-3-0105.fits	186.5115	14.8803	nan	16.25	0.17	127.24	5.12	0.87	0.19	SBA	B
frame-r-003903-1-0037.fits	186.6843	9.048	6957.8	16.29	0.23	19.61	15.48	1.23	0.66	SBA(s)	B
frame-r-003841-6-0151.fits	187.5688	8.5241	nan	16.87	0.59	74.94	12.82	1.31	0.68	SBA	B
frame-r-002190-4-0054.fits	190.0477	5.3783	14073.0	17.49	0.25	80.13	6.62	0.53	0.47	SBA(s)	B
frame-r-003841-6-0178.fits	191.5647	8.3483	nan	15.77	0.53	38.19	5.32	1.41	0.53	SBA	B
frame-r-003903-3-0070.fits	191.6931	9.2956	7154.8	16.11	0.29	110.93	27.66	2.51	0.49	SBA	B
frame-r-002190-6-0026.fits	185.7987	6.072	7109.7	15.91	0.097	34.93	8.01	2.47	0.31	SBA(r)	B
frame-r-003842-4-0057.fits	189.55	7.8126	11453.8	17.26	0.62	159.86	6.49	nan	0.49	SBA(s)	B

Cuadro 4.1: Catálogo final de galaxias estudiadas. En la columna final membership: M:miembros, P:posibles miembros, B: background

Hemos analizado un total de 60 galaxias barradas de tipo morfológico SB0 y SBa situadas en distintos entornos. La muestra de datos se ha tomado de los catálogos VCC y EVCC y ha sido dividida en tres grupos según su localización en el diagrama espacio-fase. Las galaxias situadas en la zona virializada de Virgo son aquellas que han sufrido el entorno del cúmulo más intensamente ya que se encuentran en el cúmulo desde hace varios Gaños y son un total de 25 galaxias. Las galaxias situadas en la zona de infall son miembros del cúmulo que ya han sentido los efectos del entorno pero menos intensamente ya que su llegada al cúmulo ha sido hace $\approx 1Gyr$, este grupo lo componen 11 galaxias. Por último las galaxias de background que no pertenecen al cúmulo son las galaxias que se encuentran en los entornos más débiles, sumando 24 galaxias. Se ha ampliado el número de galaxias a analizar añadiendo un grupo de galaxias de background y similares tipos morfológicos en el rango de magnitudes absolutas donde no aparecían galaxias en el catálogo. Estas galaxias se han tomado de Aguerri et al. (2015). [42]

Los resultados fundamentales derivados del estudio pueden resumirse como sigue.

- Tras calcular la densidad local de cada galaxia respecto a sus cinco galaxias más cercanas se obtienen unas densidades entre $1 < \log(\sum_b) < 4$. La mayoría de galaxias de background se encuentran en densidades locales menores que las galaxias pertenecientes al cúmulo, de modo que las galaxias estudiadas se encuentran en entornos de menor densidad que las de Virgo.
- Para las galaxias de la zona virializada y zona de infall existe una correlación entre la longitud de la barra y la luminosidad, galaxias más luminosas poseen barras más largas, algo que no sucede en las galaxias de background. Estas galaxias de background sin embargo presentan barras más largas respecto a las de Virgo para una luminosidad fija, siendo más notable para galaxias de menor magnitud absoluta. Los valores de las longitudes de las barras se encuentran entre 0.8 y 10 kpc.

- En la representación del radio que cubre el 90% de la luminosidad de la galaxia frente a la magnitud absoluta se ve que para una cierta luminosidad las galaxias de background son mayores que las del cúmulo. Esto indicaría que el entorno influye en el tamaño de las galaxias. No obstante si normalizamos el radio de las barras con el tamaño (R_b/R_{90}) desaparecen las diferencias para las barras de las galaxias. Por tanto para las galaxias de Virgo las barras son más pequeñas porque las galaxias son más pequeñas, es decir, **el entorno no influye en el tamaño de las barras de las galaxias**, si lo hace en el tamaño de las propias galaxias. Así el radio de la barra dependerá de las propiedades de los discos donde crecen en la propia galaxia.
- Se ha calculado la fuerza de las barras respecto a la luminosidad y se puede ver que las barras más fuertes se encuentran en las galaxias más luminosas. Se ha tomado un rango de magnitudes entre -19.5 y -18.5, debido a que tenemos una restricción de datos para las galaxias de background, pues solo tenemos valores de la barra para estas galaxias en ese rango. Para este intervalo, las barras de las galaxias de background son más fuertes que las galaxias del cúmulo. Estas diferencias pueden ser debidas a que, como muestran las simulaciones numéricas, las interacciones gravitatorias que sufren las galaxias en entornos de alta densidad, como el cúmulo de Virgo, hacen que sus discos sean más gruesos que los de galaxias similares en campo que no han experimentado interacciones tan fuertes.

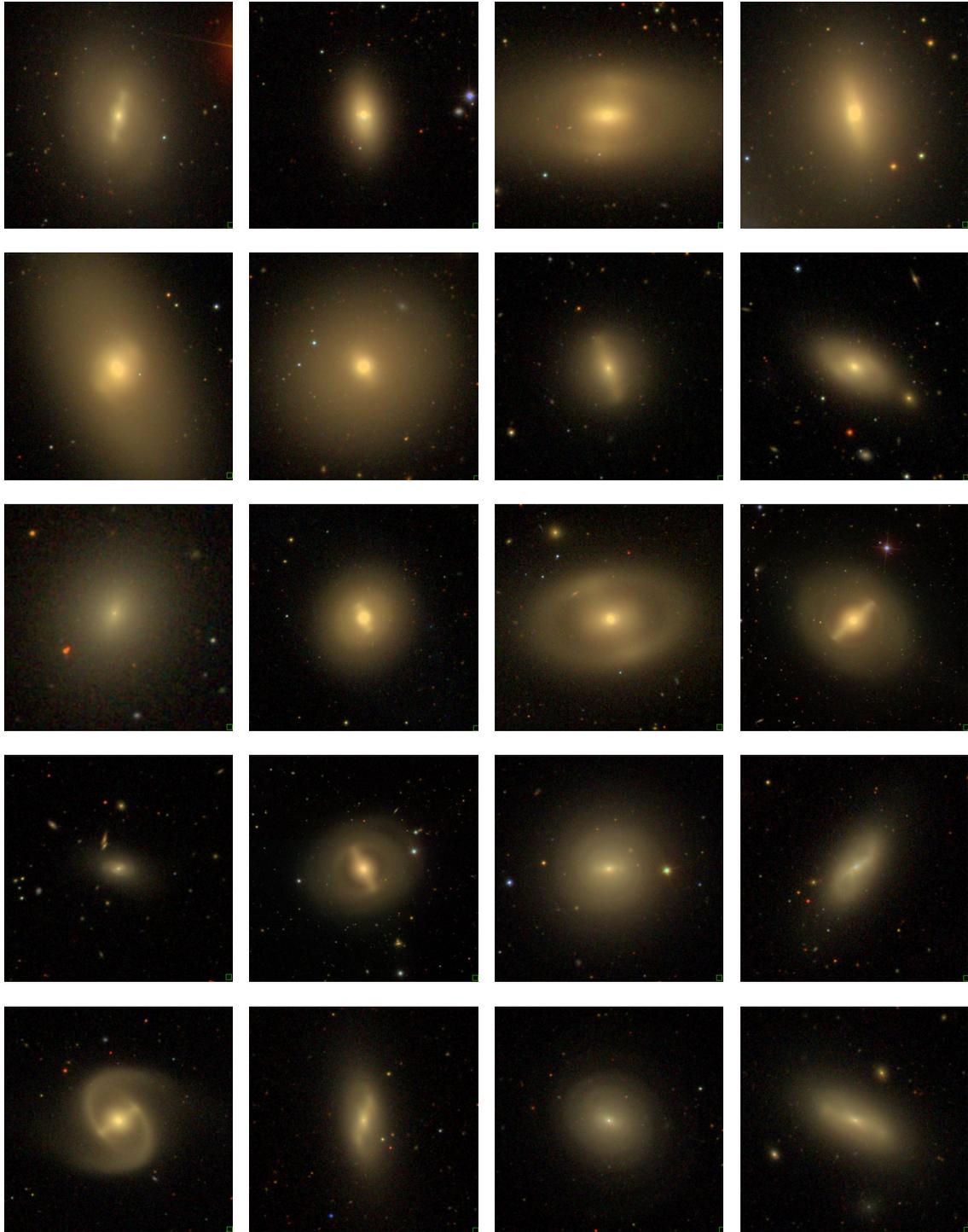


Figura 5.1: Imágenes de las 60 galaxias en la banda r analizadas en el estudio tomadas de SDSS Dr16 [45]

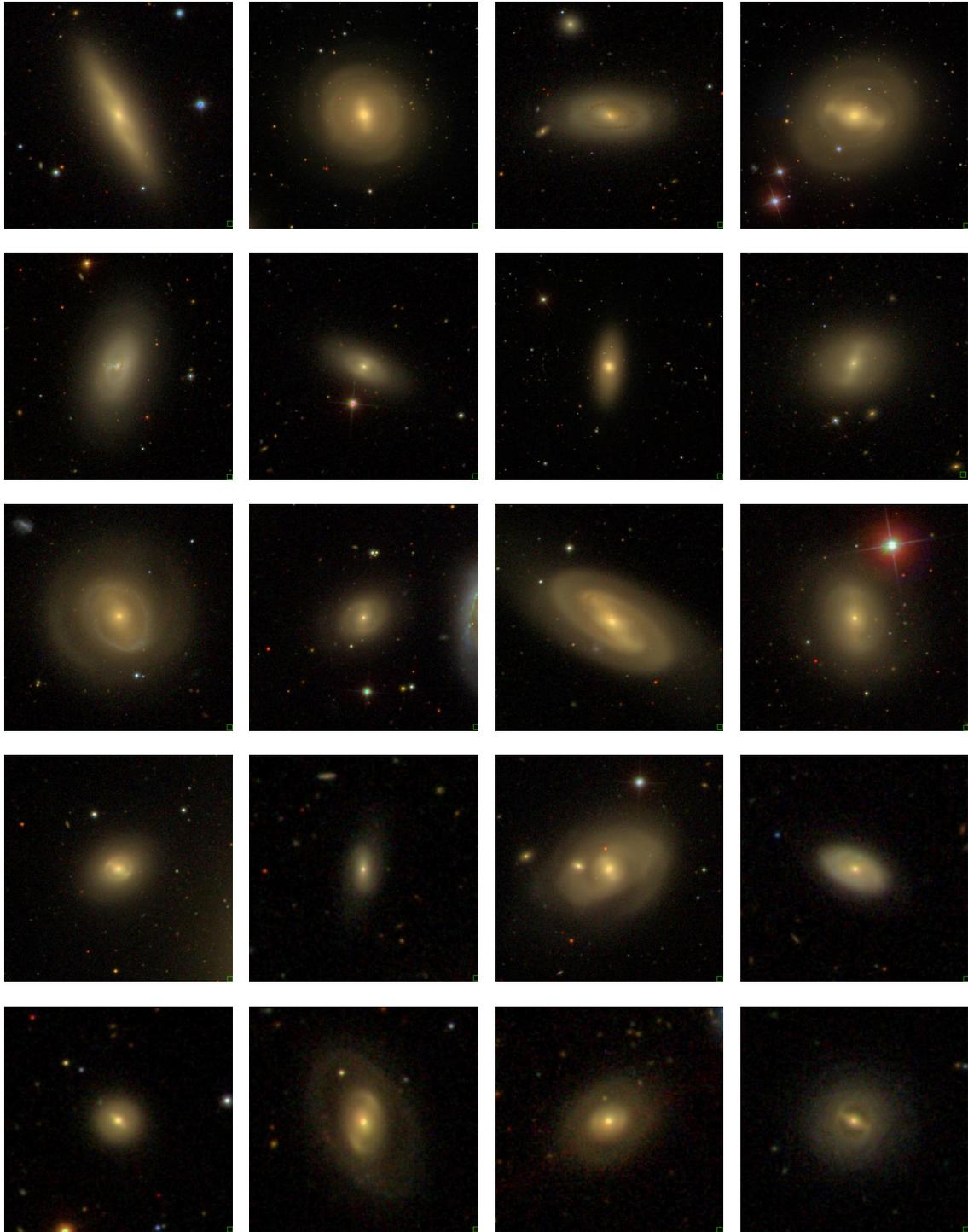


Figura 5.2: Imágenes de las 60 galaxias en la banda *r* analizadas en el estudio tomadas de SDSS Dr16 [45]

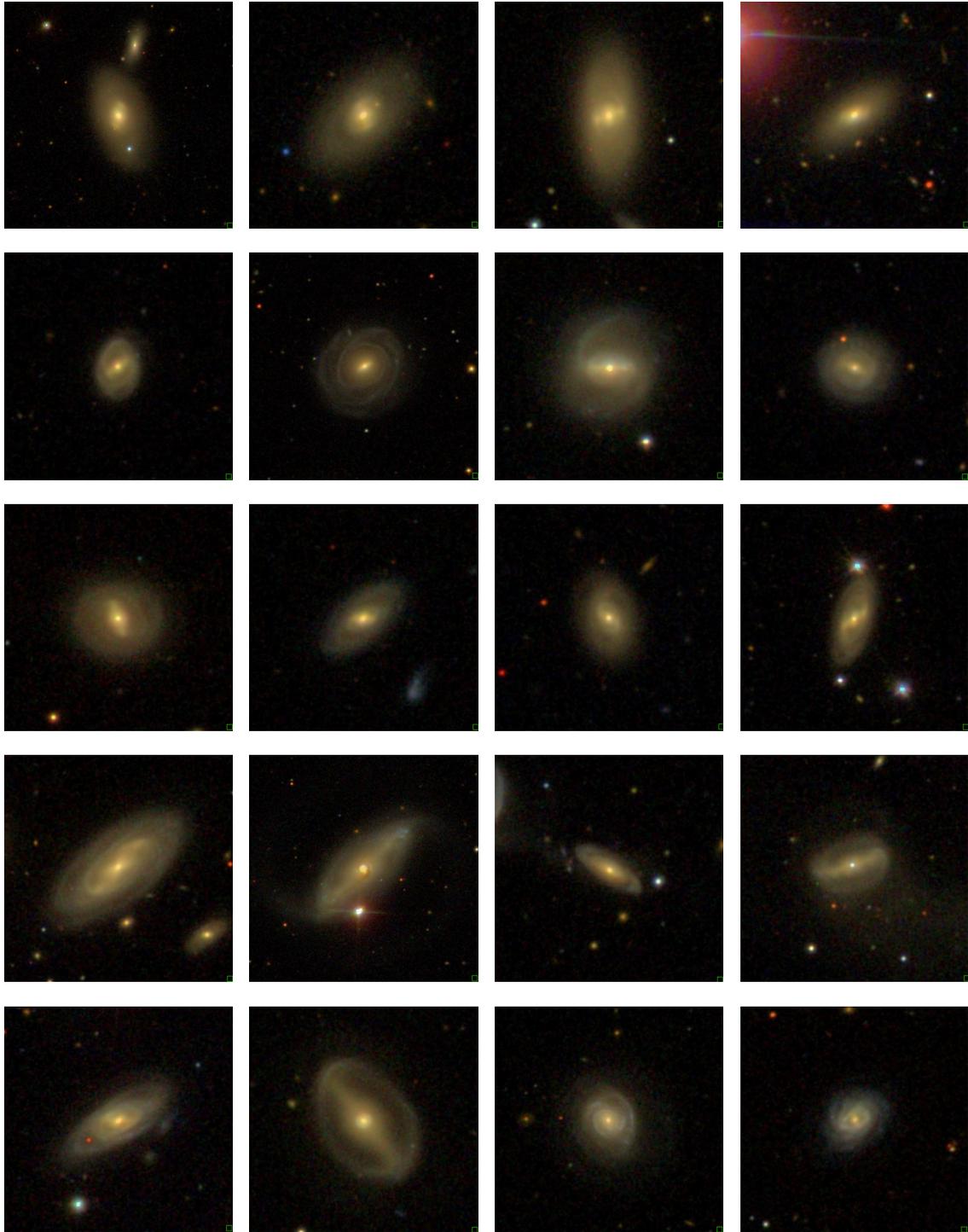


Figura 5.3: Imágenes de las 60 galaxias en la banda r analizadas en el estudio tomadas de SDSS Dr16 [45]

Bibliografía

- [1] <https://hubblesite.org/science/galaxies>
- [2] <https://es-academic.com/dic.nsf/eswiki/515013>
- [3] Imagen Cúmulo de Virgo: <https://www.elcielodecanarias.com/galeria/cumulo-de-galaxias-de-virgo/>
- [4] Eskridge, P. B., Frogel, J. A., Pogge, R. W., et al. 2000, , 119, 536. doi:10.1086/301203
- [5] [Aguerri et al.(2009)] Aguerri, J. A. L., Méndez-Abreu, J., & Corsini, E. M. 2009, , 495, 491. doi:10.1051/0004-6361:200810931
- [6] Marinova, I., Jogee, S., Barazza, F. D., et al. 2009, *Galaxy Evolution: Emerging Insights and Future Challenges*, 419, 138
- [7] Debattista, V. P. & Sellwood, J. A. 2000, , 543, 704. doi:10.1086/317148
- [8] Athanassoula, E., Machado, R. E. G., & Rodionov, S. A. 2013, , 429, 1949. doi:10.1093/mnras/sts452
- [9] Wozniak, P. R. 2000, , 50, 421
- [10] Martin, P. 1995, , 109, 2428. doi:10.1086/117461
- [11] Trujillo, I., Aguerri, J. A. L., Cepa, J., et al. 2001, , 328, 977. doi:10.1046/j.1365-8711.2001.04937.x
- [12] Barazza, F. D., Jogee, S., & Marinova, I. 2008, *Formation and Evolution of Galaxy Disks*, 396, 351
- [13] Eskridge, P. B., Frogel, J. A., Pogge, R. W., et al. 2000, , 119, 536. doi:10.1086/301203
- [14] Rautiainen, P., Salo, H., & Laurikainen, E. 2008, , 388, 1803. doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13522.x
- [15] Cepa, J. & Beckman, J. E. 1990, , 349, 497. doi:10.1086/168335
- [16] Corsini, E. M., Aguerri, J. A. L., Debattista, V. P., et al. 2007, , 659, L121. doi:10.1086/518035
- [17] Aguerri, J. A. L., Debattista, V. P., & Corsini, E. M. 2003, , 338, 465. doi:10.1046/j.1365-8711.2003.06067.x

- [18] Toomre, A. 1964, , 139, 1217. doi:10.1086/147861
- [19] Martínez-Valpuesta, I., Aguerri, J., & González-García, C. 2016, *Galaxies*, 4, 7. doi:10.3390/galaxies4020007
- [20] Mihos, J. C. & Hernquist, L. 1994, , 425, L13. doi:10.1086/187299
- [21] Mastropietro, C., Moore, B., Mayer, L., et al. 2005, , 364, 607. doi:10.1111/j.1365-2966.2005.09579.x
- [22] Aguerri, J. A. L. & González-García, A. C. 2009, , 494, 891. doi:10.1051/0004-6361:200810339
- [23] Quilis, V., Moore, B., & Bower, R. 2000, *Science*, 288, 1617. doi:10.1126/science.288.5471.1617
- [24] Mihos, J. C., Durrell, P. R., Ferrarese, L., Feldmeier, J. J., Côté, P., Peng, E. W., ... Cuillandre, J. C. (2015). Galaxies at the extremes: ultra-diffuse galaxies in the virgo cluster. *The Astrophysical Journal Letters*, 809(2), L21.
- [25] Larson, R. B., Tinsley, B. M., Caldwell, C. N. (1980). The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies. *The Astrophysical Journal*, 237, 692-707.
- [26] Balogh, M. L., Navarro, J. F., Morris, S. L. (2000). The origin of star formation gradients in rich galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 540(1), 113.
- [27] Ghigna, S., Moore, B., Governato, F., Lake, G., Quinn, T., Stadel, J. (1998). Dark matter haloes within clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 300(1), 146-162.
- [28] Lisker, T., Grebel, E. K., Binggeli, B. (2006). Virgo cluster early-type dwarf galaxies with the sloan digital sky survey. I. On the possible disk nature of bright early-type dwarfs. *The Astronomical Journal*, 132(2), 497.
- [29] Pedraz, S., Gorgas, J., Cardiel, N., Sánchez-Blázquez, P., Guzmán, R. (2002). Evidence of fast rotation in dwarf elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 332(3), L59-L63.
- [30] Toloba, E., Boselli, A., Gorgas, J., Peletier, R. F., Cenarro, A. J., Gadotti, D. A., ... Yildiz, U. (2009). Kinematic properties as probes of the evolution of dwarf galaxies in the Virgo cluster. *The Astrophysical Journal*, 707(1), L17.
- [31] Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters-Implications for the formation and evolution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 236, 351-365.

- [32] Cúmulo de Virgo: https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%BAmulo_de_Virgo
- [33] Sandage, A., Binggeli, B., & Tammann, G. A. 1985, , 90, 1759. doi:10.1086/113875
- [34] Soria, R., Kolehmainen, M., Graham, A. W., et al. 2022, , 512, 3284. doi:10.1093/mnras/stac148
- [35] Arnaboldi, M., Gerhard, O., Aguerri, J. A. L., et al. 2004, , 614, L33. doi:10.1086/425417
- [36] Zwicky, F., Herzog, E., Wild, P., et al. 1961, Pasadena: California Institute of Technology (CIT), 1c1961
- [37] Kim, S., Rey, S.-C., Jerjen, H., et al. 2014, , 215, 22. doi:10.1088/0067-0049/215/2/22
- [38] Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., et al. 2009, , 182, 543. doi:10.1088/0067-0049/182/2/543
- [39] Kashibadze, O. G., Karachentsev, I. D., & Karachentseva, V. E. 2020, , 635, A135. doi:10.1051/0004-6361/201936172
- [40] Constantes Virgo: https://ned.ipac.caltech.edu/byname?objname=virgo+cluster&hconst=70&omegam=0.3&omegav=0.7&corr_z=1
- [41] <https://www.nottingham.ac.uk/astronomy/malaysia09/talks/cote.pdf>
- [42] Aguerri, J. A. L., Méndez-Abreu, J., Falcón-Barroso, J., et al. 2015, , 576, A102. doi:10.1051/0004-6361/201423383
- [43] Aguerri, J. A. L., Gerhard, O. E., Arnaboldi, M., et al. 2005, , 129, 2585. doi:10.1086/429936
- [44] Aguerri, J. A. L., Muñoz-Tuñón, C., Varela, A. M., et al. 2000, , 361, 841
- [45] Descarga imágenes analizadas: <http://skyserver.sdss.org/dr16/en/tools/chart/list.aspx>
- [46] Cuomo, V., Lee, Y. H., Buttitta, C., et al. 2021, , 649, A30. doi:10.1051/0004-6361/202040261
- [47] Méndez-Abreu, J., Sánchez-Janssen, R., Aguerri, J. A. L., et al. 2012, , 761, L6. doi:10.1088/2041-8205/761/1/L6
- [48] Méndez-Abreu, J., Costantin, L., Aguerri, J. A. L., et al. 2018, , 479, 4172. doi:10.1093/mnras/sty1694

[49] Athanassoula, E. 1992, , 259, 328. doi:10.1093/mnras/259.2.328

[50] Méndez-Abreu, J., Aguerri, J. A. L., Zarattini, S., et al. 2010, Galaxies in Isolation: Exploring Nature Versus Nurture, 421, 269

[51] Pérez, I., Aguerri, J. A. L., & Méndez-Abreu, J. 2012, , 540, A103. doi:10.1051/0004-6361/201118396