

---

# SISTEMAS DE GALAXIAS

---

por María Fernanda Duplancic Videla

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

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Marzo de 2014

©FaMAF - UNC 2014

DIRECTOR: Dr. Diego García Lambas

CO-DIRECTOR: Dr. Laerte Sodré



## El Infinito

Canta el grillo. La alta alameda

A las estrellas se levanta.

El silencio es como una seda

Y el grillo canta, canta, canta.

Rueda la máquina del mundo,

Pavorosa en su inmenso brillo.

Y allá cerca, meditabundo.

Hay un astrónomo profundo

Que le da cuerda con el grillo.

**Leopoldo Lugones**

*Las horas Doradas (1922)*



*Dedicado a la memoria de Alba Carmen Zarate  
mi abuela de ojos tristes*



Parte de los resultados obtenidos en esta tesis han derivado en las siguientes publicaciones en revistas nacionales e internacionales:

**Título:** Galaxias Interactuantes en el SDSS

**Autores:** Duplancic, F.; O'Mill, A. L.; García Lambas, D.; Valotto, C.; Sodré, L., Jr.

**Publicaci3n:** Boletín de la Asociaci3n Argentina de Astronomía, 2010, vol.53, p.63-66

**Título:** Galaxy triplets in Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 - I. Catalogue

**Autores:** O'Mill, Ana Laura; Duplancic, Fernanda; García Lambas, Diego; Valotto, Carlos; Sodr , Laerte

**Publicaci3n:** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, Volume 421, Issue 3, p. 1897-1907

**Título:** Galaxy triplets in Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 - II. A connection with compact groups?

**Autores:** Duplancic, Fernanda; O'Mill, Ana Laura; Lambas, Diego G.; Sodré, Laerte; Alonso, Sol

**Publicaci3n:** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, Volume 433, Issue 4, p.3547-3558

Así mismo la metodología e informaci3n obtenida en este trabajo han contribuido en la publicaci3n en revistas nacionales e internacionales de los siguientes trabajos:

**Título:** Estimaciones de redshift fotométricos y correcciones k para el SDSS-DR7

**Autores:** O'Mill, A. L.; Duplancic, F.; García Lambas, D.; Sodré, L., Jr.

**Publicaci3n:** Boletín de la Asociaci3n Argentina de Astronomía, 2010, vol.53, p.15-18

**Título:** Detecci3n de filamentos en torno a cúmulos de galaxias

**Autores:** Muñoz Jofré, M. R.; Duplancic, F.; García Lambas, D.

**Publicaci3n:** Boletín de la Asociaci3n Argentina de Astronomía, 2011, vol.54, p.357-360

**Título:** Photometric redshifts and k-corrections for the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7

**Autores:** O'Mill, Ana Laura; Duplancic, Fernanda; García Lambas, Diego; Sodré, Laerte, Jr.

**Publicaci3n:** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, Volume 413, Issue 2, p.1395-1408.

**Título:** Interacciones de galaxias: sistemas co-rotantes y contra-rotantes

**Autores:** Mesa, V.; Duplancic, F.; Alonso, S.; García Lambas, D.

**Publicaci3n:** Boletín de la Asociaci3n Argentina de Astronomía, 2012, vol.55, p.313-317

**Título:** Interacting galaxies: corotating and counter-rotating systems with tidal tails

**Autores:** Mesa, Valeria; Duplancic, Fernanda; Alonso, Sol; Coldwell, Georgina; Lambas, Diego G.

**Publicaci3n:** Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, Volume 438, Issue 2, p.1784-1793.



---

# Índice general

---

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
1.1. Sistemas de Galaxias: Características Generales . . . . .	10
1.1.1. Cúmulos de Galaxias . . . . .	10
1.1.2. Grupos de Galaxias . . . . .	12
1.1.3. Tripletes de Galaxias . . . . .	14
1.1.4. Pares de Galaxias . . . . .	17
1.2. Objetivos y Metodología . . . . .	18
<b>2. Datos</b>	<b>23</b>
2.1. Sloan Digital Sky Survey . . . . .	23
2.1.1. El SDSS-DR7 . . . . .	25
2.2. Redshifts y correcciones K . . . . .	30
2.2.1. Estimaciones de redshift . . . . .	30
2.2.2. Estimaciones de correcciones K . . . . .	32
<b>3. Identificación de sistemas Triples</b>	<b>35</b>
3.1. Generalidades . . . . .	35
3.2. Algoritmo de identificación de sistemas triples . . . . .	40
3.2.1. Selección de magnitud absoluta límite, $r_{p\max}$ y $\Delta V_{\max}$ . . . . .	42

---

3.3. Criterio de aislamiento . . . . .	45
3.4. Catálogo de sistemas triples . . . . .	47
3.4.1. Tripletes de galaxias a bajo redshift . . . . .	47
3.4.2. Tripletes de galaxias a redshifts intermedios . . . . .	51
<b>4. Análisis de completitud y contaminación</b>	<b>55</b>
4.1. Generalidades . . . . .	55
4.2. Catálogo sintético . . . . .	57
4.3. Análisis de Completitud y Pureza . . . . .	60
4.3.1. Tripletes espectroscópicos . . . . .	61
4.3.2. Contaminación debida al error en $z_{\text{phot}}$ . . . . .	64
4.3.3. Imcompletitud por colisión de fibras . . . . .	68
<b>5. Análisis de configuraciones y dinámica</b>	<b>73</b>
5.1. Generalidades . . . . .	73
5.2. Análisis de Configuraciones . . . . .	78
5.2.1. Configuraciones reales versus configuraciones proyectadas . . . . .	78
5.2.2. Masa del halo de materia oscura y su relación con la configuración del triplete . . . . .	82
5.2.3. Configuraciones de tripletes . . . . .	84
5.3. Propiedades Dinámicas . . . . .	86
<b>6. Propiedades de Galaxias en sistemas triples</b>	<b>89</b>
6.1. Generalidades . . . . .	89
6.2. Propiedades de galaxias en tripletes según la configuración del sistema . . . . .	92
6.3. Comparación de propiedades de galaxias en tripletes con propiedades de galaxias en otros sistemas. . . . .	94
6.3.1. Muestras de Control . . . . .	96
6.3.2. Análisis de las propiedades de galaxias en tripletes . . . . .	98
<b>7. Propiedades globales de sistemas triples</b>	<b>105</b>
7.1. Generalidades . . . . .	105
7.2. Análisis de correlaciones de propiedades . . . . .	107

---

7.3. Masa estelar total del triplete y su influencia en las propiedades de las galaxias miembro . . . . .	110
7.4. Análisis de sistemas triples como un todo . . . . .	114
<b>Conclusiones</b>	<b>119</b>
<b>Apéndice</b>	<b>127</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>141</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>149</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>153</b>



---

# Resumen

---

En este trabajo se presenta un catálogo de tripletes de galaxias brillantes obtenido a partir del Sloan Digital Sky Survey Seven Data Release 7. El algoritmo de identificación involucra la selección de tres galaxias más brillantes que  $M_r = -20.5$  cercanas en distancia proyectada y diferencia de velocidad radial. En la construcción del mismo se han utilizado tanto datos espectroscópicos como datos con información de redshift fotométrico en el rango  $0.01 < z < 0.4$  y se ha generado un catálogo de tripletes de galaxias a bajo redshift y un catálogo a redshift intermedio. La implementación de información de redshifts fotométricos es de gran utilidad para completar la muestra de tripletes a bajo redshift, donde el efecto por colisión de fibras es más evidente, y para generar una muestra de sistemas triples cuya densidad es independiente del redshift.

Asimismo se han empleado catálogos sintéticos para cuantificar la contaminación y completitud de estos catálogos, encontrándose que cuando se emplean redshifts espectroscópicos la completitud es del orden del 67% y alcanza valores mayores ( $\sim 85\%$ ) en el caso de sistemas inmersos en halos de materia oscura menos masivos. Por otro lado la contaminación por sistemas espurios posee valores bajos ( $\sim 3.5\%$ ). Para el caso de los sistemas identificados utilizando información de redshift fotométrico se realizaron pruebas de completitud y contaminación considerando los errores de estas estimas en los datos del catálogo sintético y se encontró que la tasa de completitud no supera el 30%. Sin embargo estos resultados están de acuerdo con trabajos anteriores realizados sobre grupos de galaxias (McConnachie et al., 2008; Zandivarez et al., 2013).

Debido a que la muestra de tripletes obtenida a través de la utilización de redshifts fotométrico se encuentra sujeta a un alto grado de contaminación, se realizó un análisis detallado de las propiedades de los sistemas triples y de las galaxias que los conforman, considerando la muestra de tripletes identificados empleando información de redshift espectroscópico. Esta muestra comprende un avance importante en el análisis estadístico de sistemas triples ya que poseen mayor número de sistemas y un rango de redshift mayor que las muestras de tripletes analizadas anteriormente en la literatura.

Se realizó un análisis de configuraciones y dinámica de los tripletes espectroscópicos a través del análisis del mapa-AA de dichos sistemas. Se encuentra que las configuraciones de tripletes no presentan exceso de sistemas jerárquicos, lo que estaría indicando que los sistemas residen en un halo común ya que la presencia de materia oscura en el volumen del sistema acelera el crecimiento de las inestabilidades dinámicas, suprimiendo de esta manera la formación de pares cercanos. Desde el punto de vista dinámico se calculó el tiempo de cruce de los sistemas triples y se comparó este valor con el tiempo de cruce de diversos catálogos de sistemas, encontrándose valores similares a los correspondientes a grupos compactos de galaxias.

Relacionado a las propiedades de las galaxias en sistemas triples, se realizó un análisis comparativo entre galaxias pertenecientes a tripletes espectroscópicos con galaxias miembro de pares, grupos compactos y cúmulos. Dado que las galaxias en tripletes pueden finalmente fusionarse en un solo sistema, se analizaron también diferentes propiedades globales, como la actividad de formación estelar total, colores globales y la compacidad del sistema definida como una medida del porcentaje de la superficie total del sistema que se encuentra ocupada por la luz de las galaxias miembro. El análisis desarrollado en esta tesis sugiere que los miembros de tripletes de galaxias se comportan de manera similar a los miembros de grupos compactos y a galaxias en cúmulos ricos. También se encontró que los sistemas compuestos por tres galaxias azules, formadoras de estrellas y con poblaciones estelares jóvenes (tripletes azules) poseen alta probabilidad de ser sistemas reales y no una simple configuración espuria. Lo mismo se encontró para los tripletes compuestos por tres galaxias rojas, no formadoras de estrellas, lo que muestra la correlación de las propiedades de las galaxias miembro de tripletes. A partir del análisis del triplete en su conjunto, se

llegó a la conclusión de que, para un contenido de masa estelar total dado, los tripletes muestran una actividad total de formación estelar y colores globales similares a los grupos compactos. Sin embargo, los tripletes azules muestran una actividad de formación estelar total alta con un contenido menor de masa en estrellas. En relación al parámetro de compacidad de los sistemas se encontró que la luz está aún más concentrada en los sistemas triples analizados que en los grupos compactos.

De acuerdo a los resultados encontrados en este trabajo, se propone que los tripletes compuestos por tres galaxias luminosas, no deben considerarse como un análogo de pares de galaxias con un tercer miembro adicional, sino que son una extensión natural de los grupos compactos.

**Palabras clave:** Extragaláctica. Grupos menores - Tripletes de galaxias.

Clasificaciones:

- **98.65.At** Interacting galaxies; galaxy pairs, and triples
- **98.65.Bv** Small and compact galaxy groups
- **98.62.Qz** Magnitudes and colors; luminosities
- **98.62.Ve** Statistical and correlative studies of properties



---

# Abstract

---

This PhD Thesis work presents a catalogue of bright galaxy triplets obtained from the Sloan Digital Sky Survey Seven Data Release 7. The identification algorithm involves the selection of three galaxies brighter than  $M_r = -20.5$  that are close in projected separation and in radial velocity difference. Spectroscopic data as well as photometric redshift information in the redshift range  $0.01 < z < 0.4$  was used to generate a catalogue of galaxy triplets at low and intermediate redshifts. The implementation of photometric redshifts provide very useful information, allowing to complete the sample of nearby systems affected by fiber collisions, as well as extending the detection of triplets to large distances, where spectroscopic redshifts are not available. The final sample of triple systems shows a number density independent of redshift.

Mock catalogues was used in order to quantify the contamination and completeness of these catalogues. When spectroscopic redshifts are used, the completeness obtained is approximately 67% and reaches higher values ( $\sim 85\%$ ) in the case of systems embedded in less massive dark matter halos. The contamination due to spurious systems present low values ( $\sim 3.5\%$ ). In the case of systems identified using photometric redshifts, completeness and contamination tests were performed considering the uncertainties in these estimates on the mock catalogue data. The results obtained from this analysis show that completeness does not exceed 30%. However, these values are in agreement with previous works on galaxy groups (McConnachie et al., 2008; Zandivarez et al., 2013).

Since the sample of triplets obtained through the use of photometric redshifts

is subject to a high degree of contamination, a detailed analysis of the properties of triplets and their galaxy members was performed considering only the sample of spectroscopic triplets. This sample represents a significant progress in the statistical analysis of triple systems since it comprises a higher number of objects and spans a wider redshift range than the samples of triplets analysed in the literature.

A dynamical and configuration study of the spectroscopic triplets was performed through the analysis of the AA-map (Agekyan & Anosova, 1968). The configurations of triplets do not present an excess of hierarchical systems, which could be indicating that these systems reside in the same halo since the presence of dark matter in the volume of the triplet accelerates the growth of dynamic instabilities, suppressing the formation of close pairs. From a dynamic point of view, it was found that the crossing-time of the triplets is similar to that in compact groups.

Regarding the properties of galaxies in triple systems, a comparative analysis between spectroscopic triplet galaxies and the members of pairs, compact groups and clusters was performed. Since galaxies in triplets may eventually merge into a single system, different global properties, such as total star formation activity, global colors and the compactness of the system defined as a measure of the percentage of the system total area that is filled by the light of member galaxies, were analysed. The results obtained suggest that members of galaxy triplets behave similarly to members of compact groups and galaxies in rich clusters. It has also been found that systems composed by three blue, star forming, young stellar populations galaxies (blue triplets) are most probably real systems and not a chance configuration of interloping galaxies. The same holds for triplets composed by three red, non star-forming galaxies, showing the correlation of galaxy properties in these systems. The analysis of the triplet as a whole shows that, at a given total stellar mass content, the triplets present a total star formation activity and global colours similar to compact groups. However, blue triplets exhibit a high total star formation activity with a lower stellar mass content. From an analysis of the compactness parameter of the systems it was found that light is even more concentrated in triplets than in compact groups.

Based on the results obtained in this Thesis work, it is proposed that triplets composed by three luminous galaxies, should not be considered as an analogous of

---

galaxy pairs with a third extra member, but rather they are a natural extension of compact groups.



---

# Capítulo 1

## Introducción

---

Las galaxias son los bloques fundamentales en la construcción en gran escala del universo. La distribución de las mismas en el espacio no es uniforme. Si se analiza un mapa de las posiciones espaciales de las galaxias del universo local se encuentra que forman parte de un ambiente de filamentos y vacíos conocido como red cósmica. En el paradigma estándar de formación del universo, las grandes estructuras se forman a partir de acreción de sistemas de galaxias menos masivos. Luego, los cúmulos y supercúmulos de galaxias no son sólo las mayores estructuras ligadas gravitacionalmente sino que también son las que se han formado más recientemente. De acuerdo con este escenario de formación jerárquica, las galaxias se encuentran preferentemente agrupadas en configuraciones que van desde sistemas dobles o pares de galaxias hasta cúmulos formados por decenas e incluso centenas de galaxias. Entre estos dos extremos se encuentra un rango de sistemas menores tales como tripletes de galaxias, grupos compactos y grupos de galaxias con 4 o más miembros que poseen masas viriales menores que la de los cúmulos.

En este escenario jerárquico de formación de estructura es fundamental el análisis de sistemas de galaxias y de las propiedades de las galaxias que los conforman. La finalidad de este capítulo es introducir al lector en las generalidades de los diversos sistemas de galaxias, a través de una descripción de las principales características de los mismos y de las galaxias que los componen. Una vez concluido este análisis

descriptivo, se expondrán los lineamientos generales de la tesis desarrollada en este trabajo.

## 1.1. Sistemas de Galaxias: Características Generales

### 1.1.1. Cúmulos de Galaxias

Los cúmulos de galaxias fueron foco de estudio desde que se observaron como agrupaciones de galaxias en las placas fotográficas (Wolf, 1906). Estos sistemas poseen radios del orden de  $1 - 2\text{Mpc}$  y una dispersión de velocidad radial, calculada con las galaxias que los conforman, del orden de  $1000\text{km s}^{-1}$ . El tiempo de cruce calculado para estos sistemas es mucho menor que la edad del universo, lo cual evidencia que se encuentran ligados gravitacionalmente. Sin embargo la dispersión de velocidad proyectada de los cúmulos es demasiado grande como para que el sistema permanezca ligado únicamente por la atracción gravitacional mutua de las galaxias que los conforman (Zwicky, 1937). Diversos métodos utilizados para estimar la masa de los cúmulos, tales como la utilización del teorema del virial o de la ecuación de equilibrio hidrostático así como estimas empleando lentes gravitacionales, coinciden en que estos sistemas poseen gran cantidad de materia oscura que suministra la fuerza de gravedad adicional necesaria para que el sistema sea estable. El halo de materia oscura en el que se encuentran inmersas las galaxias en cúmulos contribuye aproximadamente con el 80 % de la masa del sistema, el contenido bariónico en galaxias y gas aportan el 20 % restante.

Otra característica distintiva de los cúmulos de galaxias es el alto contenido de gas intra-cúmulo que poseen. La temperatura de este gas oscila entre  $10^7 - 10^8\text{K}$  y contribuye con aproximadamente el 15 % de la masa total del sistema. Este plasma caliente emite en rayos X a través del proceso de bremsstrahlung térmico, haciendo de los cúmulos los objetos más brillantes en rayos X luego de las galaxias con núcleos activos (AGN). La emisión en rayos X de estos sistemas es extendida con radios entre  $0.2 - 2\text{Mpc}$  (Sarazin, 1986).

Una consecuencia del contenido de gas difuso caliente en los cúmulos de galaxias es el conocido efecto de Sunyaev-Zel'dovich (SZ): los electrones pertenecientes al

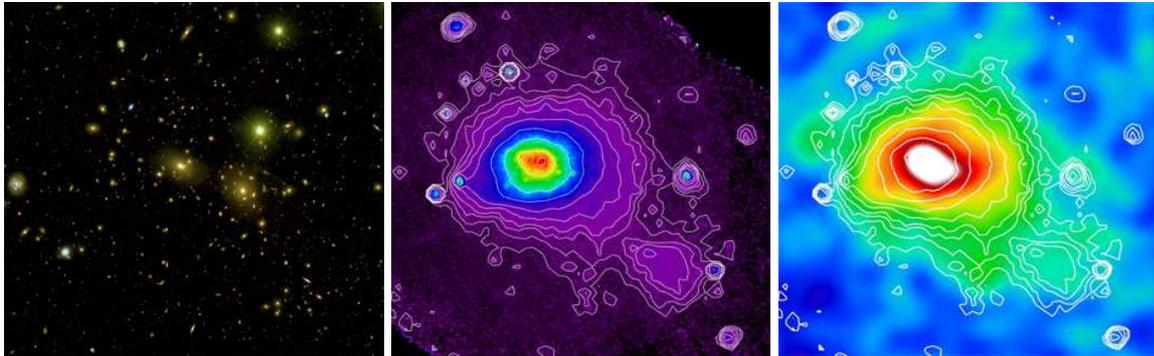
medio intra-cúmulo caliente producen pequeñas distorsiones en el espectro de la radiación de fondo de microondas al interactuar con los fotones a través de un proceso de Compton Inverso. El efecto SZ es una característica distintiva de los cúmulos de galaxias que está siendo utilizada actualmente para la identificación de estos sistemas en un amplio rango de redshift ya que es independiente de este parámetro.

No sólo el contenido de materia de los cúmulos es peculiar, sino que las galaxias que los conforman presentan características particulares. En comparación con las galaxias de campo (o galaxias aisladas) que poseen preferentemente morfología espiral, la población galáctica de los cúmulos se encuentra dominada por galaxias elípticas con poblaciones estelares envejecidas. La fracción de galaxias elípticas aumenta al incrementarse la densidad media del cúmulo, por este motivo los cúmulos de galaxias más masivos poseen mayor fracción de galaxias elípticas que los cúmulos de menor masa (Oemler, 1974). Así mismo existe una correlación de la morfología con la densidad local de galaxias por lo que la fracción de galaxias elípticas es mayor en los centros de los cúmulos que en las regiones exteriores (Dressler, 1980). Un caso extremo de esta segregación morfológica es que en los cúmulos regulares se observa un tipo morfológico particular de galaxias que sólo se encuentra en los centros de cúmulos masivos: las galaxias central dominante (CD). Estas galaxias son elípticas gigantes formadas por fusiones reiteradas de galaxias menos masivas, en consecuencia es común encontrar galaxias CD con núcleos dobles.

Las galaxias en cúmulos poseen aproximadamente el mismo color y si se analiza la dependencia entre la luminosidad y el color de las mismas se encuentra correlación. De esta manera las galaxias en cúmulos definen, en el diagrama color-magnitud, una relación aproximadamente lineal conocida como secuencia roja (Baum et al., 1959). Existe variación de esta característica distintiva de los cúmulos con el redshift, por este motivo la secuencia roja puede ser utilizada para estudiar la evolución de los cúmulos de galaxias.

La figura 1.1 muestra imágenes del cúmulo de Coma en diferentes longitudes de onda. El cúmulo de Coma es uno de los cúmulos regulares más cercano y contiene más de mil galaxias observadas. Como se aprecia en la imagen óptica de la figura 1.1 su centro está dominado por dos elípticas gigantes, las imágenes en rayos X muestran

un alto contenido de gas que contribuye al efecto SZ como puede apreciarse en longitudes de onda de radio milimétricas.



**Figura 1.1:** Imágenes del cúmulo de Coma en longitud de onda visible obtenida desde el SDSS (izquierda), en rayos X obtenida por el satélite ROSAT (centro) y en longitud de onda de radio milimétrica obtenida por el satélite Planck con contornos de emisión en rayos X de ROSAT superpuestos (derecha).

*Fuente:* NASA/SDSS (Izquierda); ESA/ROSAT (centro); ESA/Consortio LFI y HFI, observatorio Planck (derecha).

### 1.1.2. Grupos de Galaxias

Los grupos de galaxias son sistemas con densidades intermedias entre cúmulos y campo. Usualmente se consideran grupos a aquellos sistemas compuestos por más de cuatro galaxias pero que contienen menos miembros que los cúmulos. Sin embargo no existe una línea distintiva entre cúmulo y grupo ya que al analizar la membresía de un sistema hablamos de número de galaxias más brillantes que una cierta magnitud límite en un volumen determinado. Podemos distinguir entre tres tipos de grupos: grupos difusos, grupos compactos y grupos fósiles.

En el caso de los grupos difusos la separación media entre miembros es varias veces el tamaño característico de las galaxias que los componen, mientras que las galaxias en grupos compactos se encuentran separadas a distancias similares a sus tamaños medios. Sin embargo, tanto grupos compactos como grupos difusos poseen dispersiones de velocidades promedio del orden de los  $200\text{km s}^{-1}$ , valor mucho menor al estimado para cúmulos de galaxias. En el caso de los grupos compactos la proximidad de las galaxias miembro y la baja dispersión de velocidades convierten a estos sistemas en un escenario ideal para las fusiones. En las etapas finales de la vida de grupos compactos, las galaxias pueden fusionarse en una sola galaxia elíptica

gigante, formando lo que se conoce como grupo fósil.

Sin embargo, para las configuraciones compactas de galaxias se espera una tasa de fusión mucho mayor a la observada, esto se resuelve si se considera que los grupos compactos se encuentran inmersos en halos masivos de materia oscura (Bode et al., 1993). Otra solución a esta controversia reside en considerar a los grupos compactos como configuraciones que se forman constantemente dentro los grupos difusos (Diaferio et al., 1994; Governato et al., 1996). De manera alternativa, la baja tasa de fusiones podría explicarse si los grupos compactos fueran alineaciones al azar dentro de grupos difusos, o filamentos vistos de frente.

Observaciones en rayos X de grupos compactos y difusos sugieren que estos sistemas poseen propiedades similares, sin embargo sus luminosidades en rayos X son usualmente bajas en comparación a cúmulos de galaxias. La detección de emisión extendida en rayos X en los grupos de galaxias hace que estos sistemas posean mayor probabilidad de ser sistemas físicos reales, sin embargo esto no implica que sean sistemas virializados. Las bajas luminosidades en X observadas en grupos de galaxias hacen referencia a sistemas que aún se encuentran evolucionando dinámicamente, inclusive existen grupos donde el gas aparentemente ha alcanzado la temperatura de emisión de rayos X por otros mecanismos, tales como choques.

Este esquema evolutivo de grupos de galaxias se ve soportado también por las observaciones de HI en grupos compactos de galaxias. Verdes-Montenegro et al. (2001) proponen una secuencia donde en una primera fase el gas se encuentra concentrado preferentemente en las galaxias que componen el sistema, y a medida que este evoluciona, el gas es extraído desde las galaxias hacia el medio intragrupo donde puede concentrarse en nubes intergalácticas o formar una gran nube que contiene a todas las galaxias del sistema y que posee un único gradiente de velocidades, sin embargo este último escenario se observa en pocos casos.

Los grupos de galaxias presentan una alta fracción de galaxias elípticas y rojas en comparación con la población de galaxias azules de campo. En el caso de los grupos compactos las galaxias se encuentran confinadas casi exclusivamente a la secuencia roja. Además estudios basados en simulaciones numéricas (Brasseur et al., 2009) sugieren que la mayoría de las galaxias azules, formantes de estrellas y de tipos morfológicos tardíos en grupos compactos son galaxias “intrusas”, es decir galaxias

que se observan en proyección pero que no se encuentran asociadas físicamente al sistema.

Los grupos fósiles son el estado evolutivo final de sistemas donde las galaxias miembro se han fusionado para formar una galaxia central elíptica muy brillante (Ponman et al., 1994). Un escenario alternativo de formación de estos sistemas es el expuesto por Mulchaey & Zabludoff (1999) que proponen que los grupos fósiles son "grupos fallidos", es decir, grupos formados originalmente con una función de luminosidad de galaxias atípica, donde la mayoría de los bariones se utilizaron en la formación de una sola galaxia brillante.

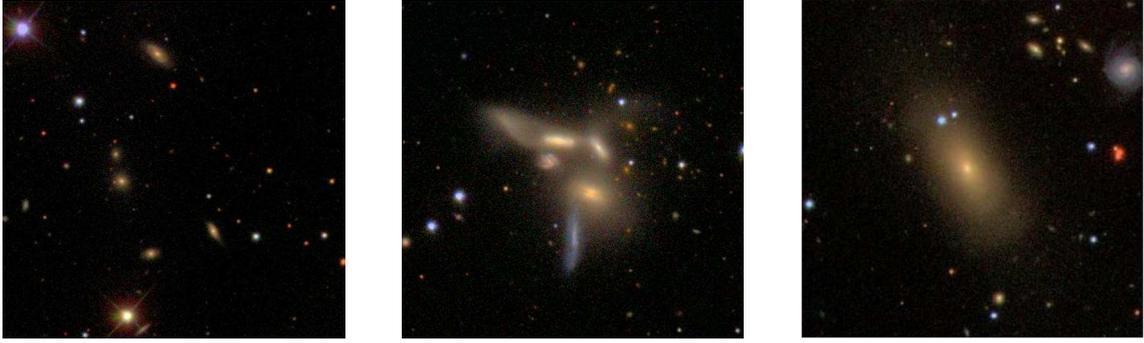
Usualmente los grupos fósiles presentan emisión extendida en rayos X con luminosidad similar a la encontrada en grupos y cúmulos de galaxias. Según la definición de Jones et al. (2003) un grupo fósil es una fuente extendida en rayos X cuya luminosidad proviene de gas difuso y caliente con  $L_{X,bol} \geq 10^{42} h_{50}^{-2} \text{ergs}^{-1}$ . Según estos autores, la contraparte óptica es un sistema de galaxias ligado gravitacionalmente con  $\Delta m_{12} > 2\text{mag}$ , donde  $\Delta m_{12}$  es la diferencia total en magnitud en la banda  $R$  entre la primera y segunda galaxia más brillante del sistema, dentro de un radio proyectado igual a la mitad del radio virial.

Las escalas temporales de fricción dinámica de galaxias luminosas ( $L^*$ ) sugieren que los grupos fósiles son sistemas evolucionados con una tasa baja de acreción de galaxias  $L^*$  desde su colapso inicial. En este sentido se sugiere que los grupos fósiles son casos extremos de una distribución homogénea de grupos de galaxias, en lugar de una clase particular de sistemas (Dariush et al., 2007), es decir que existe un esquema evolutivo donde grupos difusos, compactos y fósiles pueden ser considerados como diferentes estadios de un mismo sistema.

La Figura 1.2 muestra imágenes ópticas de un ejemplo de grupo difuso un grupo compacto y un grupo fósil de galaxias.

### 1.1.3. *Tripletas de Galaxias*

A diferencia del problema dinámico de dos cuerpos, que es completamente determinista y posee solución analítica exacta, el problema dinámico de tres cuerpos es altamente caótico y no admite en absoluto una solución analítica general. Por



**Figura 1.2:** Imágenes de un grupo difuso (izquierda), un grupo compacto (centro) y un grupo fósil de galaxias (derecha), obtenidas a partir del SDSS.

*Fuente:* <http://cas.sdss.org/astrodr7>.

este motivo, al comienzo del estudio de sistemas menores de galaxias, los tripletes no eran considerados sistemas físicos reales. Sin embargo, la dinámica de un sistema de galaxias no debe restringirse al análisis dinámico de partículas puntuales. Las galaxias que componen un triplete tienen que ser consideradas como sistemas auto-gravitantes que pueden absorber energía orbital y momento angular durante los encuentros. Asimismo debe considerarse que estos sistemas pueden estar inmersos en halos extensos de materia oscura que regulan su dinámica.

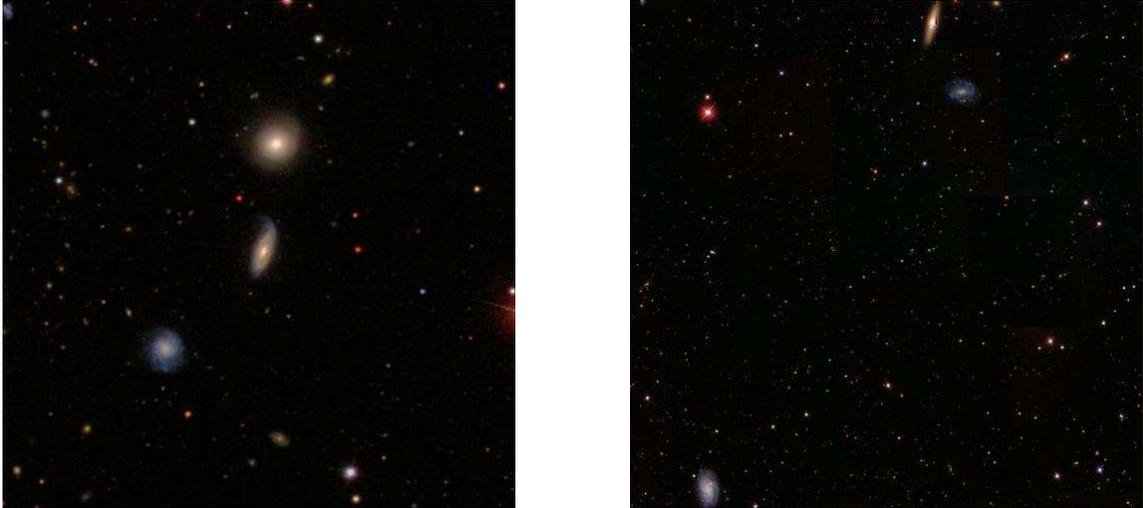
Diversos mecanismos han sido propuestos para la formación de sistemas triples de galaxias. Chernin & Mikkola (1991) realizaron una primera aproximación analizando la dinámica de tripletes de galaxias a través de un modelo que considera tres partículas puntuales de igual masa. Esta configuración deriva en un exceso de estructuras jerárquicas, es decir sistemas compuestos por un par de partículas cercanas más una partícula ubicada a grandes distancias. En este escenario, Chernin et al. (1994) propone que la observación de sistemas jerárquicos se reduce significativamente al considerar al triplete inmerso en un halo extenso de materia oscura. Zheng et al. (1993) tiene en cuenta la fricción dinámica al modelar las galaxias y considerar al triplete como un estado temporal en la evolución dinámica de grupos mayores. El estudio dinámico de una configuración particular de sistemas conocida como tripletes extensos fue analizado por Chernin et al. (2000). Las galaxias miembro de estos sistemas se encuentran separadas entre sí a distancias que pueden superar 1 Mpc. Estos autores encuentran que los tripletes extensos son configuraciones que corresponden a sistemas en proceso de colapso gravitacional y que poseen un contenido de materia oscura que es entre 15-30 veces mayor al contenido de materia bariónica del

sistema. Aceves (2001), propone un modelo de sistema triple en el que las galaxias ya no son masas puntuales sino que son consideradas esferas de Plummer. En este escenario los tripletes compactos son casos extremos de sistemas de tres galaxias que comenzaron en una configuración difusa, que han alcanzado su configuración dinámica a través de un proceso de colapso gravitacional sin sufrir fusiones mayores y que se encuentran en estado cercano al equilibrio viral. Por otro lado, los tripletes extensos son sistemas que están a punto de sufrir un colapso gravitacional. En este análisis la presencia de un halo primordial masivo de materia oscura no es requisito para explicar la evolución dinámica de sistemas triples de galaxias. Sin embargo este autor propone que es necesario analizar la evolución dinámica de sistemas triples de galaxias en un escenario cosmológico de manera de poder trazar la historia de halos de materia oscura que conforman el sistema.

Observaciones en rayos X favorecerían la hipótesis de un halo común de materia oscura en sistemas triples. Algunos estudios han detectado emisión extendida en rayos X para sistemas triples (Mulchaey et al., 2003), sin embargo la mayoría de los sistemas observados pertenecen al catálogo de grupos compactos de Hickson (Hickson, 1982) y no a un estudio sistemático de la emisión en rayos X de tripletes de galaxias. Por este motivo los resultados deben considerarse como preliminares y no es posible hacer un análisis estadístico de la emisión en X de sistemas triples de galaxias, ni estudiar la correlación de la emisión difusa en rayos X con el halo de materia oscura que contiene al sistema.

En lo referente a las propiedades de galaxias miembro de sistemas triples, estudios realizados por algunos autores (Karachentseva et al., 1979; Hernández-Toledo et al., 2011) sugieren que los tripletes están dominados por galaxias de tipo morfológico espiral con una alta fracción de galaxias que poseen signos de interacción. Sin embargo, hasta el momento no se ha realizado un estudio estadístico detallado de galaxias en tripletes. Esto es consecuencia de que no existe en la actualidad un catálogo de sistemas triples obtenido desde una muestra homogénea de galaxias, completa y limitada en volumen.

La figura 1.3 muestra ejemplos de tripletes de galaxias compactos y extensos.



**Figura 1.3:** Imágenes de un triplete compacto (izquierda) y uno extenso (derecha) del catálogo de Karachentseva et al. (1979) y Trofimov & Chernin (1995), respectivamente.

Fuente: <http://cas.sdss.org/astrodr7>.

#### 1.1.4. Pares de Galaxias

Las interacciones y fusiones entre galaxias juegan un rol importante en la evolución de galaxias individuales y de la población galáctica. Los medios densos son los escenarios predilectos para identificar galaxias en interacción. Sin embargo debe considerarse que para que un encuentro entre galaxias sea efectivo la velocidad relativa entre las mismas debe ser baja. Por este motivo los cúmulos de galaxias, a pesar de ser sistemas que pueden contener miles de galaxias, no favorecen las fusiones debido a que su dispersión de velocidades es del orden de  $1000\text{km s}^{-1}$ . Por este motivo los grupos compactos y pares de galaxias son los sistemas predilectos para el desarrollo de fusiones galácticas ya que las galaxias que los conforman se encuentran a distancias similares a sus tamaños característicos y la dispersión de velocidades del sistema es baja.

La dinámica de la interacción entre dos galaxias ha sido estudiada utilizando simulaciones numéricas (por ejemplo, Toomre & Toomre, 1972). El resultado de tales interacciones genera perturbaciones en las galaxias tales como colas tidales y puentes de marea. En algunos casos las interacciones pueden terminar en fusiones dependiendo de la velocidad relativa, orientación y masa de las galaxias involucradas. Si las galaxias interactuantes son de masas similares, entonces el resultado de la interacción puede ser una galaxia elíptica de gran masa. Si la fusión ocurre entre

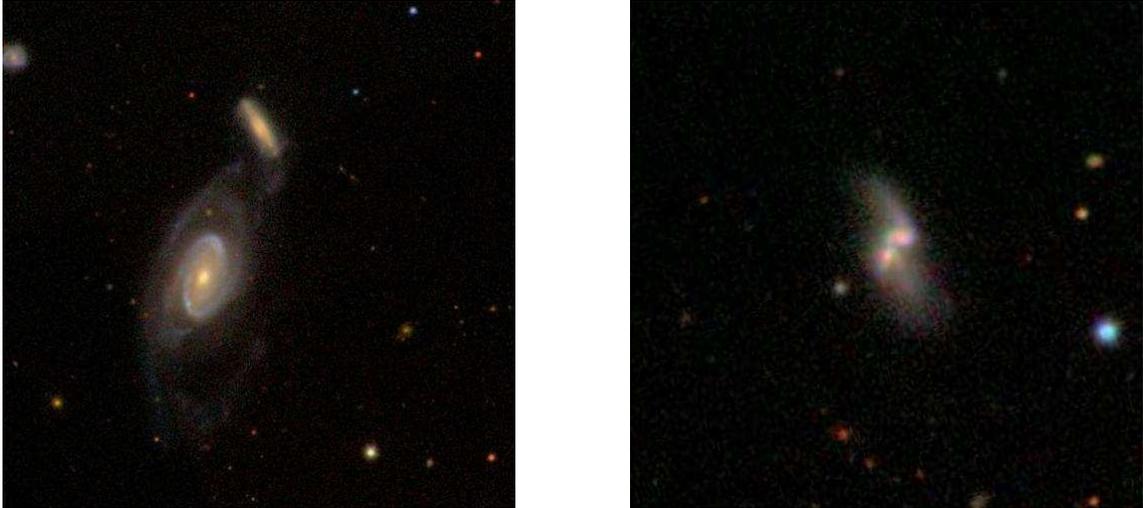
una galaxia masiva y otra de baja masa, la galaxia mayor permanecerá prácticamente inalterada.

Los pares de galaxias aislados han sido foco de estudio de diversos autores en la literatura. Karachentsev (1972) compiló un catálogo de pares aislados, con distancias proyectadas características entre 50-100 kpc, utilizando datos 2D del “Palomar Observatory Sky Survey” (POSSI, POSSII) y considerando galaxias con magnitudes en el visual más brillantes que 15.7. Con la llegada de los grandes relevamientos de galaxias con mediciones de redshift espectroscópico, los métodos de identificación de pares en 3D utilizan como regla restricciones en distancia proyectada ( $r_p$ ) y diferencia de velocidad radial relativa ( $\Delta V$ ) entre galaxias. Los valores que se elijan para la identificación de pares deben estar relacionados con signos de interacción en las galaxias que sufren el encuentro. Por ejemplo Lambas et al. (2003) utilizan el catálogo “2dF” para identificar pares de galaxias considerando  $r_p < 100 h^{-1}$  kpc y  $\Delta V < 350 \text{ km s}^{-1}$ . Sin embargo estos autores encuentran que la formación estelar de las galaxias involucradas se incrementa en relación a una muestra control de galaxias aisladas para pares seleccionados considerando  $r_p < 25 h^{-1}$  kpc y  $\Delta V < 100 \text{ km s}^{-1}$ . Este fenómeno puede considerarse como evidencia de la interacción sobre las galaxias en estos pares ya que, durante el encuentro, el gas de las galaxias sufre procesos como ondas de choque y compresión, dejando nubes que pueden enfriarse y formar nuevas generaciones de estrellas.

La figura 1.4 muestra imágenes de colas tidales en galaxias interactuantes y de una fusión entre galaxias de similar masa.

## 1.2. Objetivos y Metodología

Sistemas como cúmulos de galaxias, grupos difusos, grupos compactos y pares de galaxias han sido foco de estudio de numerosos artículos en la literatura. Sin embargo el estudio de sistemas triples de galaxias y de las propiedades de las galaxias que los componen no se ha desarrollado extensamente hasta la actualidad. La mayoría de los trabajos se enfocan en el aspecto dinámico de este tipo de sistemas a través del desarrollo de simulaciones numéricas. También se han analizado las propiedades globales que describen a los tripletes tales como la masa virial del sistema



**Figura 1.4:** Imágenes de un par en interacción que muestra colas tidales entre las galaxias (izquierda) y una fusión entre dos galaxias de masas similares (derecha), seleccionados desde el catálogo de Lambas et al. (2012).

*Fuente:* <http://cas.sdss.org/astrodr7>.

y la relación masa-luminosidad. En lo referente a las galaxias miembro se ha hecho énfasis en la clasificación morfológica de las mismas y en el análisis de la fracción de estos tipos morfológicos. Los sistemas más estudiados son los tripletes compactos obtenidos por el equipo de Karachentsev & Karachentseva, el catálogo original fue compilado para el hemisferio norte en el año 1979 utilizando los datos del “Palomar Sky Survey”. Sin embargo en la actualidad no existe un catálogo de sistemas triples obtenido desde grandes relevamientos de galaxias tales como el “Sloan Digital Sky Survey” (SDSS). Por este motivo diversas preguntas referidas a estos sistemas aún se encuentran abiertas. Por ejemplo: ¿Existe una población homogénea de sistemas triples de galaxias? De ser así, ¿cómo son las propiedades de las galaxias que los componen? ¿El triplete puede considerarse como un par de galaxias más una galaxia extra, o sus propiedades son similares a grupos de galaxias? ¿Puede analizarse la evolución del sistema con el redshift?

El presente trabajo pretende dar respuesta a la mayoría de estas preguntas. Para tal fin se plantean los siguientes objetivos y metodología de trabajo:

- **Objetivo 1:** Obtener un catálogo de sistemas triples derivado desde una muestra que sea completa y limitada en volumen. Esto es esencial para analizar las propiedades de las galaxias que habitan los tripletes y poder realizar un estudio de estos sistemas y sus galaxias miembro.

**Metodología:** Para este fin se utilizarán datos obtenidos desde el séptimo relevamiento del SDSS (SDSS-DR7). Se considerarán galaxias con información de redshift espectroscópico así como también galaxias con redshift fotométricos obtenidos desde el catálogo de O'Mill et al. (2011). El algoritmo de identificación de sistemas se basará en la selección de galaxias cercanas en diferencia de velocidad radial y distancia proyectada en el cielo. Se utilizaran catálogos sintéticos para determinar la contaminación y completitud del catálogo obtenido a través de este algoritmo. Con el propósito de seleccionar tripletes aislados se impondrá un criterio de aislamiento eficiente de manera de garantizar que estos sistemas no se encuentren en estructuras mayores que puedan influenciar la dinámica del triplete así como las propiedades de las galaxias miembro.

- **Objetivo 2:** Realizar una caracterización de los sistemas triples a través del estudio de sus propiedades dinámicas y de configuración.

**Metodología:** Se analizarán propiedades tales como configuraciones proyectadas de los sistemas, radios, dispersión de velocidades, compactidad y tiempos de cruce. Se compararán estos parámetros con los obtenidos en la literatura para otras muestras de sistemas triples.

- **Objetivo 3:** Caracterizar las galaxias miembro de sistemas triples a través del análisis de sus propiedades espectroscópicas y fotométricas.

**Metodología:** Para tal fin se utilizará información extraída desde los espectros de las galaxias tales como tasa de formación estelar específica e indicadores de edad de las poblaciones estelares. También se analizarán propiedades derivadas desde la fotometría tales como índices de color, índice de concentración de las galaxias y magnitud absoluta. Los resultados obtenidos serán comparados con muestras de galaxias miembro de diferentes sistemas tales como pares, grupos compactos y cúmulos de galaxias.

- **Objetivo 4:** Es sabido que muchos sistemas menores de galaxias terminan en fusiones que pueden derivar en grupos fósiles. Por este motivo en este trabajo se analizarán las propiedades de sistemas triples considerándolos como una única galaxia.

**Metodología:** Se analizarán propiedades globales del sistema tales como la tasa de formación efectiva total, el color global y el contenido total de masa en estrellas. Los resultados obtenidos se compararán con análisis similares para otros sistemas de galaxias.

Durante este trabajo se empleará un modelo cosmológico caracterizado por los siguientes parámetros:  $\Omega_m = 0.25$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.75$  y  $H_0 = 70 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$



---

# Capítulo 2

## Datos

---

### 2.1. Sloan Digital Sky Survey

Sloan Digital Sky Survey (SDSS, York et al., 2000) es un catálogo espectroscópico y fotométrico en cinco bandas que abarca más de un cuarto de la esfera celeste, en latitudes galácticas elevadas principalmente. Los objetivos del proyecto están relacionados fundamentalmente con la estructura en gran escala del universo que es trazada por galaxias y quasars, sin embargo sus utilidades se extienden a diversas áreas de la astronomía como la estructura y población estelar de la Vía Láctea, las galaxias enanas compañeras de nuestra galaxia, asteroides y otros cuerpos pequeños del sistema solar, etc.

Las principales metas del proyecto son:

- Obtener imágenes CCD que cubran un área de aproximadamente  $\pi$  estereorradianes, con un FWHM de aproximadamente 1 segundo de arco para fuentes puntuales del hemisferio norte galáctico, utilizando el sistema fotométrico *ugriz*.
- Obtener imágenes CCD de una franja cercana al ecuador galáctico correspondiente a aproximadamente 200 grados cuadrados.

- Obtener espectros para un conjunto de galaxias y quasars, seleccionados convenientemente en base al catálogo fotométrico.
- Proveer los datos a la comunidad científica para el estudio detallado de la distribución en gran escala de galaxias y quasars, de la función de luminosidad de quasar con  $0 < z < 5$  y para realizar identificación y análisis de cúmulos de galaxias.

El SDSS es un proyecto conjunto del Fermilab, el Institute of Advance Study, el Japan Participation Group, el instituto de Astronomía Max-Planck, el United State Naval Observatory y las universidades de Chicago, Princeton, Johns Hopkins y Washington. Las observaciones se realizan con un telescopio de 2.5m ubicado en el Apache Point Observatory (Nuevo Méjico). Cuenta con una cámara CCD de 142 Mega píxeles que cubre 1.5 grados cuadrados de cielo en una sola imagen. Además posee dos espectrógrafos que, usando fibra óptica, pueden medir hasta 600 espectros de forma simultánea.

Durante su primer fase de operación (SDSS-I, años 2000 a 2005), el SDSS mapeó más de 8000 grados cuadrados del cielo y obtuvo espectros de galaxias y quasars seleccionados desde 5700 grados cuadrados del catálogo fotométrico. Finalizada esta primer fase, la colaboración del SDSS se expandió incluyendo más de 25 instituciones y un nuevo soporte financiero. En esta segunda etapa del survey (SDSS-II, años 2005 a 2008) se realizaron tres proyectos fundamentales:

- **Sloan Legacy Survey:** que completó las metas originales del mapeo fotométrico y espectroscópico del SDSS. La base de datos final incluye 230 millones de objetos celestes detectados en 8400 grados cuadrados de imágenes y espectros de 930000 galaxias, 120000 quasars y 225000 estrellas.
- **SEGUE** (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration): sondeo de la estructura e historia de la Vía Láctea, con nuevas imágenes de 3500 grados cuadrados y espectros de 240000 estrellas.
- **El Sloan Supernova Survey:** llevó a cabo repetición en las imágenes de 300 grados cuadrados de la banda ecuatorial del sur, con la finalidad de descubrir

y medir supernovas y otros objetos variables. Se han descubierto aproximadamente 500 supernovas tipo Ia, confirmadas espectroscópicamente, que se están utilizando para determinar la historia de la aceleración de la expansión cósmica durante los últimos cuatro miles de millones de años.

El SDSS-II completó los objetivos originales del proyecto obteniendo imágenes profundas multicolor que cubren más de 120 grados cuadrados. El conjunto de datos final también incluye espectros de 930.000 galaxias, 120.000 cuásares y 460.000 estrellas. Los datos, totalmente calibrados y reducidos, cuidadosamente seleccionados por su calidad y accesible a través de bases de datos eficientes, han sido puestos a disposición de la comunidad astronómica cada aproximadamente 14 meses y constituyen lo que se denomina Data Realeases. Durante los 8 años de funcionamiento se han liberado 7 versiones siendo el SDSS-DR7 la versión final que contiene la información acumulada durante todo el período operativo.

Actualmente el SDSS continúa con una tercera etapa el SDSS-III. Este proyecto pretende obtener cuatro nuevos catálogos basados en intereses científicos diferentes (BOSS, SEGUEII, APOGEE y MARVELS) utilizando las instalaciones del SDSS. SDSS-III comenzó las observaciones en julio de 2008 liberando el DR8 en enero de 2011 y el DR9 en agosto de 2012. Se prevé que el proyecto siga operativo hasta el año 2014. Para más información visitar <http://www.sdss.org/>.

### 2.1.1. El SDSS-DR7

En este trabajo se utilizan datos fotométricos y espectroscópicos del SDSS-DR7. La tabla 2.1 lista las principales características de este catálogo y la figura 2.1 muestra la cobertura espacial, en coordenadas ecuatoriales celestes, de los catálogos espectroscópicos y fotométricos de los proyectos Legacy y SEGUE.

En este trabajo los datos han sido extraídos desde el “Catalog Archive Server” (CAS<sup>1</sup>) que proporciona acceso a los catálogos de objetos, e información relacionada, del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Es un complemento de la “Data Archive Server” (DAS<sup>2</sup>), el cual permite a los usuarios descargar imágenes en bruto (FITS)

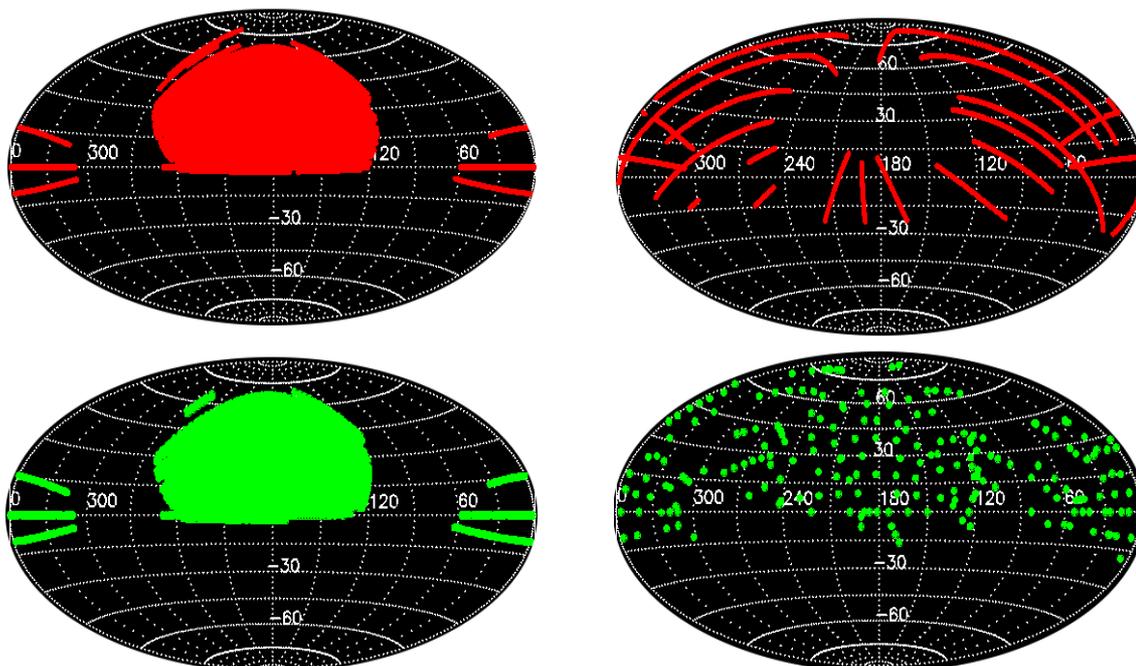
---

<sup>1</sup><http://cas.sdss.org/astrodr7/>

<sup>2</sup><http://das.sdss.org/>

Tabla 2.1: Principales características del SDSS-DR7

<b>Fotometría</b>	
<i>Área</i>	11663 grados cuadrados
<i>Objetos catalogados</i>	357 millones
<i>Bandas fotométricas y magnitudes límite</i>	$u$ (3551 Å) $\Rightarrow$ 22.0 $g$ (4686 Å) $\Rightarrow$ 22.2 $r$ (6165 Å) $\Rightarrow$ 22.2 $i$ (7481 Å) $\Rightarrow$ 21.3 $z$ (8931 Å) $\Rightarrow$ 20.5
<i>Ancho PSF</i>	1.4" (media en banda $r$ )
<i>Calibración Fotométrica</i>	$r \Rightarrow 2\%$ $u - g \Rightarrow 3\%$ $g - r \Rightarrow 2\%$ $r - i \Rightarrow 2\%$ $i - z \Rightarrow 3\%$
<i>Astrometría</i>	$<0.1''$ rms absolutos por coordenada
<b>Espectroscopia</b>	
<i>Área</i>	9380 grados cuadrados
<i>Resolución</i>	1800-2200
<i>Señal/Ruido</i>	$>4$ por pixel ( $g=20.2$ )
<i>Precisión en redshift</i>	30kms
<i>Magnitudes límite (Objetos de la muestra principal)</i>	Galaxias: Petrosian $r < 17.77$ Quasar: PSF $i < 19.1$



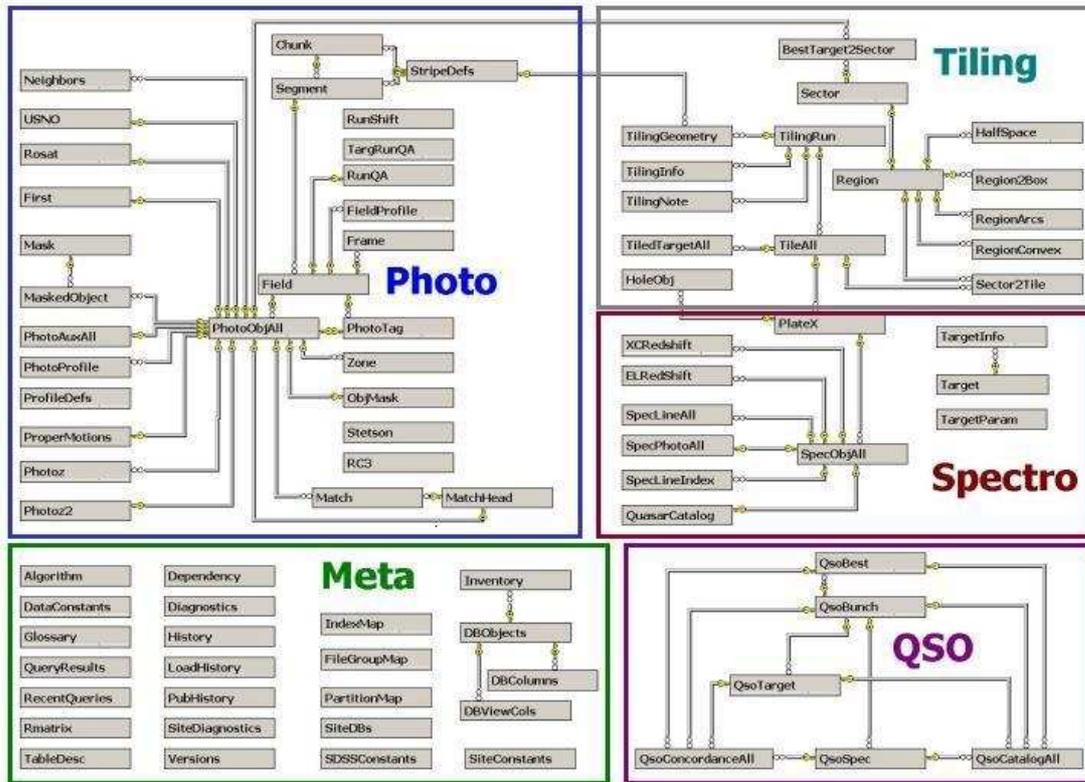
**Figura 2.1:** Distribución en coordenadas ecuatoriales celestes de los objetos pertenecientes a los proyectos Legacy (izquierda) y SEGUE (derecha) del SDSS-DR7. En rojo se muestran los campos fotométricos (paneles superiores), y en verde los espectroscópicos (paneles inferiores).

*Fuente:* <http://www.sdss.org/dr7/>.

y espectros del catálogo.

El catálogo de datos del SDSS se almacena en un sistema comercial de gestión de bases de datos relacional (DBMS) de Microsoft SQL Server. Por consiguiente, los datos se organizan en diversas tablas de dos dimensiones. Las tablas y las relaciones que existen entre ellas se conocen como esquema, la figura 2.2 muestra un diagrama del esquema del SDSS-DR7.

Existen 3 tipos diferentes de datos en las tablas: datos fotométricos en las tablas del grupo **photo**, datos espectroscópicos y de tiling en las tablas **spectro** e información adicional en las tablas **meta**. Algunas tablas fueron creadas específicamente por conveniencia, como por ejemplo la tabla **SpecPhotoAll** que une información pre-computada de campos importantes de las tablas **PhotoObjAll** y **SpecObjAll**. La información de las tablas es accesible también a través de las Vistas, una Vista es un subconjunto de una tabla específica que se puede utilizar en lugar de la tabla, en este sentido cumple la función de una tabla virtual. Utilizar las Vistas es, generalmente, más rápido que emplear la tabla base, ya que sólo se carga un subconjunto de los objetos.



**Figura 2.2:** Diagrama del esquema del SDSS-DR7. Desde este gráfico pueden apreciarse las diferentes tablas del SDSS-DR7 y la organización y relación entre la información disponible. Fuente: <http://cas.sdss.org/astrodr7/>

Un punto a destacar es que las Vistas contienen la información relevante para realizar trabajos científicos ya que han sido filtradas de objetos tales como el cielo u observaciones defectuosas. Por ejemplo las tablas *PhotoObj* y *SpecObj* son Vistas de las tablas *PhotoObjAll* y *SpecObjAll* respectivamente. Los dos grandes grupos de datos de interés científico se encuentran nucleados en estas tablas. En ellas se puede encontrar todos los parámetros medidos para los objetos fotométricos y toda la información espectroscópica de los objetos con espectroscopía. Debido a que el contenido de información en ellas es muy grande, se han creado diversas Vistas desde estas tablas.

Los catálogos espectroscópicos del SDSS contienen parámetros tales como redshift, clasificación, dispersión de velocidad, indicadores de la calidad, y parámetros similares, medidos a partir de cada espectro. Los objetos espectroscópicos son seleccionados desde los objetos con fotometría y se agrupan en las siguientes categorías:

- Galaxias Principales (MGS): Objetos seleccionados desde las detecciones fotométricas en la banda *r*, que satisfacen separación estrella galaxia, y poseen

magnitud límite  $r = 17.77$ . Los objetos deben también satisfacer una serie de cortes en diferentes parámetros de manera de obtener la categoría de galaxias en esta muestra. El redshift medio de las galaxias en la muestra MGS es  $z \sim 0.1$ . Para más detalles ver Strauss et al. (2002).

- Galaxias Rojas Luminosas (LRG): Galaxias seleccionadas en base al color y magnitud para producir una muestra de galaxias intrínsecamente rojas y luminosas más débil y más lejana que la MGS. Existen dos categorías: la ClaseI es una muestra LRG limitada en volumen hasta  $z = 0.38$ , que se extiende hasta  $z \sim 0.45$  y la ClaseII que alcanza distancias  $z \sim 0.55$ . Ver Eisenstein et al. (2001) para discusiones detalladas sobre la selección de la muestra.
- Quásares (QSO): El algoritmo de selección de estos objetos identifica principalmente los quásares como objetos puntuales con valores atípicos en el locus estelar modelado dentro de cubos de colores  $(u-g, g-r, r-i)$  y  $(g-r, r-i, i-z)$ . Además, los objetivos también son seleccionados correlacionando con el catálogo de radio fuentes FIRST. Ver Richards et al. (2002).
- Estrellas: Seleccionadas siguiendo criterios de color.
- Objetos ROSAT: Se correlacionan objetos SDSS que se encuentren dentro del radio de error de las fuentes del ROSAT All Sky Survey (RASS).

En este trabajo hemos utilizado las galaxias pertenecientes a la MGS así como objetos fotométricos seleccionados desde la tabla `PhotoObjAll`. Las magnitudes utilizadas han sido magnitudes Petrosian (Petrosian, 1976), calibradas al sistema AB (Oke & Gunn, 1983).

Estas magnitudes están definidas a través del cociente de Petrosian:

$$\mathcal{R}_P(r) = \frac{\int_{0.8r}^{1.25r} 2\pi r' I(r') dr' / [\pi(1.25^2 - 0.8^2)r^2]}{\int_0^r 2\pi r' I(r') dr' / (\pi r^2)}$$

donde  $I(r)$  es el perfil promedio de brillo superficial azimutal. El radio de Petrosian  $r_P$  se define como el radio en el que  $\mathcal{R}_P(r_P)$  es igual un valor límite específico, en el caso del SDSS este valor es igual a 0.2. El flujo Petrosian en cualquier banda se define entonces como el flujo dentro de 2 radios de Petrosian, esta apertura es

lo suficientemente grande como para contener aproximadamente todo el flujo de los perfiles de galaxias típicas y lo suficientemente pequeña de manera que el ruido del cielo sea despreciable.

Para la fotometría del SDSS, la apertura para las 5 bandas se establece únicamente por el perfil de la galaxia en la banda  $r$ . Este procedimiento garantiza una apertura constante en la estima del color mediante la comparación de flujos en diferentes bandas. Un punto a destacar es que a diferencia de los perfiles exponencial y de deVaucouleurs, el radio de Petrosian es extraordinariamente constante, en tamaño físico, en función del redshift.

## 2.2. Redshifts y correcciones K

### 2.2.1. Estimas de redshift

Para el caso de las MGS, se poseen mediciones de redshift espectroscópico que son precisas hasta  $\sim 30\text{km s}^{-1}$ . Sin embargo en el empleo de datos fotométricos es necesario obtener información de distancia utilizando otros métodos. Catálogos como el SDSS realizan fotometría multibanda para cientos de millones de galaxias. Debido a las limitaciones tecnológicas y financieras se obtienen redshift espectroscópicos sólo para una fracción de los datos (aproximadamente 1 millón de galaxias). Por este motivo es que en las últimas décadas se han realizado diversos esfuerzos para desarrollar técnicas que generen redshifts fotométricos, a través de la utilización de fotometría multibanda. Los redshifts calculados a través de estas técnicas son mucho menos precisos que los redshifts espectroscópicos, sin embargo en campos como la astronomía extragaláctica y la cosmología la precisión es suficiente para obtener resultados científicos útiles. La eficiencia del método se basa en la identificación de características espectrales fuertes que puedan ser identificadas aún luego de haber integrado la distribución de energía espectral (SED) bajo la función de transmisión del filtro.

Existen varias técnicas para la obtención de redshifts fotométricos entre las que se destacan dos categorías:

- **Ajuste de Templates:** Se utilizan librerías de espectros sintéticos (templates)

para encontrar la distribución de energía espectral (SED) de la galaxia, que mejor reproduce los flujos observados en los distintos filtros. De esta manera se asigna a la galaxia el redshift del template que mejor ajuste a las observaciones. Es necesario que los templates sean representativos de la clase de galaxias a analizar, pudiendo ser derivados tanto desde la observación como de modelos de síntesis espectral. Los resultados obtenidos dependen tanto de la calidad de los templates utilizados como de la adecuada comparación de los mismos con los datos observacionales.

- **Métodos Empíricos:** En estos métodos se utiliza un conjunto de galaxias que posean redshifts espectroscópicos, además de la fotometría, de manera de derivar una relación empírica entre observables fotométricos (por ejemplo magnitudes, colores e indicadores de morfología) y el redshift medido desde el espectro.

Si se encuentra disponible una muestra de galaxias con espectroscopía que sea suficientemente grande y representativa de los datos fotométricos a ser analizados, es mejor optar por métodos empíricos. El empleo de estos métodos resulta en estimas de redshifts fotométricos que poseen menor dispersión y bias, respecto de los redshifts verdaderos, que los obtenidos utilizando ajustes de templates. Sin embargo si se disponen de pocos análogos espectroscópicos puede utilizarse un ajuste de templates a la muestra fotométrica de manera de obtener los redshifts fotométricos

Debido a las dificultades a la hora de realizar mediciones de redshifts espectroscópicos para magnitudes débiles y objetos con bajo brillo superficial es difícil obtener una muestra espectroscópica que sea representativa de la muestra fotométrica. En el mejor de los casos se podrá encontrar una muestra que sea suficientemente grande de manera de minimizar las fluctuaciones estadísticas y que posea distribuciones similares de magnitudes, colores y redshift (al menos en un intervalo de distancias) que la muestra fotométrica.

En este trabajo se utilizarán redshifts fotométricos obtenidos por O'Mill et al. (2011). Estos autores calculan redshifts fotométricos y correcciones  $K$  para galaxias en la tabla `PhotoObjAll` del SDSS-DR7. Los datos se encuentran disponibles en <http://casjobs.starlight.ufsc.br/casjobs/>. Las estimas de redshift fueron realizadas

utilizando el código público ANNz (Collister & Lahav, 2004), que está basado en el empleo de redes neuronales artificiales, con una arquitectura de la forma 9:14:14:14:1. El conjunto de entrenamiento de la red se construyó considerando galaxias pertenecientes a los catálogos MGS, LRGs y AGN del SDSS-DR7. La elección de diferentes muestras de galaxias para el conjunto de entrenamiento proporciona una amplia diversidad de objetos con diferentes rangos de redshift, permitiendo mejorar las estimas de los redshift fotométricos. En el entrenamiento se consideraron los siguientes parámetros fotométricos: magnitudes en cinco bandas (*ugriz*), índices de concentración y radios Petrosian, en las bandas *g* y *r*. Estos dos últimos parámetros son entradas adicionales que no se consideran usualmente en las muestras de entrenamiento y que contribuyen a mejorar la estima de los redshift fotométricos ya que el índice de concentración proporciona información relativa a la morfología de la galaxia y los radios de Petrosian son una medida robusta del tamaño angular de la misma, siendo además un parámetro muy estable en función del redshift.

Los resultados para los redshifts fotométricos ( $z_{\text{phot}}$ ) tienen un error promedio rms  $\sigma_{\text{phot}} = 0.0227$ . Los autores también encuentran buen acuerdo de estas estimas con la distribución teórica de redshift esperada para los datos del SDSS, en el rango de  $0 < z_{\text{phot}} \leq 0.6$ .

Para obtener información detallada sobre los métodos empleados para estimar los redshift fotométricos y correcciones K utilizados en este trabajo, ver O'Mill (2011).

### 2.2.2. Estimas de correcciones K

La SED de galaxias distantes posee un corrimiento al rojo, por este motivo mientras más distante es la galaxia mayor es el corrimiento hacia el azul que experimentan los filtros en relación al referencial de reposo de la SED del objeto observado. Esto es: al desplazarse el espectro de una galaxia, la banda de emisión Q a un redshift  $z$  es observada como banda R en el referencial de reposo.

La corrección K se define como el término correctivo que debe aplicarse a la magnitud observada en cierta banda para tener en cuenta el efecto del redshift sobre la misma. Generalmente se define una función  $K(z)$  que debe ser sumada al módulo bolométrico de distancia cosmológica estándar ( $DM(z)$ ) para obtener la

relación entre la magnitud aparente  $m_R$  en la banda R y la magnitud absoluta M de la banda Q (con Q diferente de R):

$$m_R = M_Q + DM(z) + K_{qr}(z)$$

Como se describe en Oke & Sandage (1968) el calculo de la corrección K se realiza proyectando con el redshift las SED de un conjunto de objetos observados del mismo tipo, teniendo en cuenta la respuesta instrumental en función de la longitud de onda (incluyendo los efectos de la atmósfera la transmisión del filtro y la respuesta del CCD).

Sin embargo, no todas las galaxias poseen igual distribución espectral de energía ni son seleccionadas desde algún conjunto discreto de SEDs. Blanton et al. (2003) proponen la utilización de un método a través del cual pueda inferirse la SED de un conjunto de galaxias, a un redshift determinado, a través de la utilización de espectros sintéticos para reconstruir el flujo en dicha banda y compararlo con el observado. Estos autores desarrollaron el software **k-correct**<sup>3</sup> que aplica estos métodos para calcular correcciones K. La mayor desventaja de este procedimiento es que utiliza un número limitado de templates que disminuye al aumentar el redshift.

En el presente trabajo se ha utilizado el software **k-correct\_v4.2** (Blanton & Roweis, 2007) para el cómputo de las correcciones K (llevadas a  $z = 0.1$ ) de las galaxias de la MGS. Para las galaxias con información de redshift fotométricos se han empleado las correcciones K obtenidas por O'Mill et al. (2011). Estos autores calculan las correcciones K a través de una parametrización conjunta con el redshift y el color absoluto ( $M_g - M_r$ ) (a  $z = 0.1$ ) de las galaxias. Se obtiene un buen ajuste a partir de una relación lineal  $K=A+Bz$ , donde A y B son funciones de ( $M_g - M_r$ ). El color intrínseco de una galaxia está relacionado con su distribución de energía espectral, por lo tanto es posible utilizar esta propiedad para computar correcciones K a mayor redshift, donde la técnica de Blanton presenta mayores problemas. Las ventajas de esta técnica es que emplea bajo tiempo computacional, ya que no depende de una librería de templates, y también puede ser extrapolada fácilmente a redshifts mayores donde las librerías presentan menor número de espectros.

---

<sup>3</sup><http://howdy.physics.nyu.edu/index.php/Kcorrect>



---

# Capítulo 3

## Identificación de sistemas Triples

---

### 3.1. Generalidades

La identificación de estructuras en la distribución en gran escala del universo es una tarea importante para la astronomía moderna. Antiguamente los astrónomos utilizaban la inspección visual para identificar patrones en la distribución espacial de las estrellas observables a simple vista. Las observaciones extragalácticas modernas permiten identificar patrones en la estructura en gran escala del universo. Esta identificación no se realiza visualmente sino a través de algoritmos estadísticos optimizados para la identificación de estructuras, que estén menos sujetos a los sesgos que puedan introducirse a través de una inspección visual.

Los primeros algoritmos desarrollados se centraron en la identificación de cúmulos de galaxias por ser estas estructuras las primeras en localizarse en las imágenes ópticas como grandes conjuntos de galaxias. Estos sistemas poseen alta sobredensidad y simetrías que los hacen fácilmente identificables utilizando datos en dos dimensiones. Por otro lado, las propiedades particulares de estos sistemas, tales como la secuencia roja, emisión en rayos X del gas intracúmulo y efecto SZ, ayudan a optimizar los algoritmos de identificación. Sin embargo la alta dispersión de velocidades de las galaxias en cúmulos dificultan la implementación de algoritmos 3D que incluyan información del redshift por el conocido efecto de los Dedos de Dios,

que hace que los cúmulos de galaxias se observen alargados, en el espacio de redshift, con eje mayor en la dirección del observador. Este efecto es causado por un desplazamiento Doppler asociado con las velocidades peculiares de las galaxias en el cúmulo que genera un cambio en el redshift observado de las mismas y esto conduce a mediciones de distancia inexactas.

Desde el criterio de Abell (Abell, 1958) que identifica cúmulos como sobredensidades compuestas por más de 10 galaxias, en el rango  $[m_3, m_3 + 2]$ , siendo  $m_3$  la magnitud de la tercer galaxia más brillante, dentro de 1.5 Mpc, diversos algoritmos han sido desarrollados para la identificación de cúmulos utilizando datos en proyección así como implementando información de redshift espectroscópico. Por ejemplo Shectman (1985) desarrolló un método de identificación de cúmulos como máximos locales de densidad sobre un fondo suavizado. Postman et al. (1996) desarrollaron el algoritmo “matched filter” (MF) que asume un modelo de cúmulo para la identificación de este tipo de sistemas; este algoritmo es luego optimizado por Kepner et al. (1999) (AMF) y Kim et al. (2002) (HMF). Ascaso et al. (2012) también realizan una optimización del MF a través de la implementación de estadística bayesiana. En lo referente a la secuencia roja Gladders & Yee (2000) desarrollaron un algoritmo para identificar cúmulos basados en esta propiedad distintiva. Annis et al. (1999) presentaron la técnica “maxBCG” que identifica cúmulos de galaxias a través del empleo de la secuencia roja más características distintivas de las más brillantes de estos sistemas. La técnica “maxBCG” fue luego optimizada por Koester et al. (2007). Ramella et al. (2001) utilizó dos algoritmos, el HMF y maxBCG, para identificar este tipo de sistemas y luego genera un catálogo uniendo los sistemas identificados con ambos métodos. Diversos algoritmos tales como el “CE”, “C4” y “GMBCG” (Goto et al., 2002; Miller et al., 2005; Hao et al., 2009) también utilizan esta característica distintiva de las galaxias en cúmulos de agruparse en una región determinada del diagrama color-magnitud. Técnicas basadas en los diagramas de Voronoi también han sido aplicadas en la identificación de cúmulos de galaxias (por ejemplo, Marinoni et al., 2002; Söchting et al., 2006).

En lo referente a la identificación de grupos de galaxias, la mayoría de los autores utilizan el algoritmo percolativo “amigo del amigo” (FOF) desarrollado por Huchra

& Geller (1982). Este método vincula galaxias (i,j) que satisfacen

$$D_{ij} = 2 \sin\left(\frac{\theta_{ij}}{2}\right) \frac{V}{H_0} \leq D_L$$

$$V_{ij} = |V_i - V_j| \leq V_L$$

donde  $D_{ij}$  es la distancia proyectada y  $V_{ij}$  es la diferencia de velocidades en la línea de la visual.  $D_L$  y  $V_L$  son las longitudes de enlace transversal y radial respectivamente, y son escaladas según  $D_0 R$  y  $V_0 R$ . El factor de escala  $R$  es introducido para tener en cuenta la disminución de densidad numérica de galaxias producida por el corte en magnitud aparente

$$R = \left[ \frac{\int_{-\infty}^{M_{ij}} \phi(M) dM}{\int_{-\infty}^{M_{lim}} \phi(M) dM} \right]^{-1/3}$$

siendo  $\phi$  la función de luminosidad diferencial y  $M_{lim}$  la magnitud límite a un redshift fiducial dado. Los valores  $D_0$  y  $V_0$  son las distancia proyectada y diferencia de velocidades del par a dicho redshift y el cociente  $D_0/V_0$  está relacionado con el valor de la densidad cosmológica promedio asumida. En este algoritmo todas las galaxias unidas por un amigo en común forman un grupo si el contraste de sobredensidad numérica supera un valor umbral fijado arbitrariamente.

Hickson (1982) desarrolló el siguiente criterio para identificar grupos compactos:

$$N(\Delta m = 3) \geq 4$$

$$\theta_N \geq 3 \theta_G$$

$$\mu_e \leq 26.0 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

Donde  $N(\Delta m = 3)$  es el número de galaxias en el intervalo de magnitud  $[r_1, r_1 + 3]$ , siendo  $r_1$  la magnitud, en la banda  $r$ , de la galaxia más brillante del grupo.  $\mu_e$  es el brillo superficial efectivo del sistema calculado distribuyendo el flujo de las galaxias miembro dentro de  $\theta_G$ , donde  $\theta_G$  es el diámetro angular del círculo más pequeño que encierra los centros geométricos de las galaxias del grupo. Finalmente,  $\theta_N$  se define como el diámetro angular del círculo más grande, concéntrico a  $\theta_G$ , que no contenga galaxias externas dentro del rango de magnitud considerado o más brillantes. Este algoritmo selecciona sistemas de 4 o más miembros que difieran en menos de 3

magnitudes. El criterio de compacticidad está dado por el valor adoptado para  $\mu_e$ . Para evitar los centros de cúmulos ricos, se implementa un criterio de aislamiento que excluye grupos que posean al menos una galaxia no miembro, no más de 3 magnitudes más débil que el miembro más brillante, dentro de un círculo tres radios mayor que el círculo mínimo que encierra todos los miembros del grupo.

Tanto el algoritmo FOF como el criterio de Hickson han sido aplicados a diversos relevamientos de galaxias resultando efectivos para generar diferentes catálogos de grupos difusos y grupos compactos.

En lo referente a algoritmos de identificación de pares de galaxias, la selección ha tenido siempre como base la identificación de sistemas cercanos en distancia proyectada y diferencia de velocidad radial. No hay valores fijados para la separación máxima que puede tener un par de galaxias, encontrando en la literatura trabajos que utilizan valores límites para la distancia proyectada que pueden ir entre pocos kpc hasta inclusive 1 Mpc, y en diferencia de velocidad radial alcanzar hasta los 1000 km s<sup>-1</sup> (ver por ejemplo, Patton et al., 2000; Lambas et al., 2003, 2012). Sin embargo la contaminación por pares proyectados siempre está presente en la selección de este tipo de sistemas, por ejemplo Soares (2007) muestra que más de la mitad de los pares simulados con  $r_p \leq 50$  kpc poseen distancias 3D mayores a 50 kpc. Por este motivo para seleccionar pares reales usualmente se buscan marcadores de interacción como incremento en la tasa de formación estelar. Otro método de garantizar que un par de galaxias sea un par físico es a través de distorsión en la morfología de las galaxias involucradas. En este sentido la inspección visual de los catálogos de galaxias pares es fundamental ya que no existen, hasta el momento, algoritmos automáticos capaces de identificar distorsiones de este tipo en las imágenes astronómicas.

Estudios pioneros en la identificación de sistemas triples de galaxias fueron llevados a cabo por Karachentseva et al. (1979). Estos autores presentaron una lista de 83 tripletes de galaxias aislados en el cielo del norte (declinación  $\delta \geq -3^\circ$ ) obtenidos desde los datos del “Palomar Sky Survey” y desde el catálogo de Zwicky et al. (1968). Para el cielo del sur ( $\delta < -3^\circ$ ) Karachentseva & Karachentsev (2000) selecciona 76 tripletes utilizando los datos de los catálogos ESO/SERC y POSS-I. El criterio de identificación considera galaxias con magnitud en el visual  $m < 15.7$ . Cada galaxia con diámetro angular  $a_1$  es examinada como posible miembro de un triplete en re-

lación a vecinos significativos con diámetros en el rango  $[0.5a_1-2a_1]$ . Estos límites fueron introducidos empíricamente para evitar contaminación por galaxias proyectadas de frente y de fondo. Un conjunto dado de tres galaxias con diámetros  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ , que satisfacen la condición anterior, es considerado un triplete aislado si la distancia al próximo vecino significativo es mayor a 3 veces la distancia entre las galaxias del triplete. Este criterio de aislamiento, elegido de forma empírica, se corresponde con un contraste de densidad del triplete en relación al fondo mayor que 10. Por otro lado, el criterio selecciona galaxias miembro sin tener en cuenta la velocidad radial, por este motivo un sistema puede ser aislado sólo en proyección. Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988) compilan los datos del seguimiento de estos sistemas utilizando el telescopio de 6m del “Special Astrophysical Observatory”. Analizando las velocidades radiales de estos tripletes aislados los autores encuentran que sólo el 64 % podían ser considerado como tripletes físicos mientras que el 36 % de los sistemas son espurios considerando que no verifican  $\Delta V_{ij} < 500 \text{ km s}^{-1}$  para todos sus miembros.

Trofimov & Chernin (1995) compilan una lista de 108 tripletes seleccionados desde los catálogos de grupos de Geller & Huchra (1983) (hemisferio Norte) y Maia et al. (1989) (hemisferio Sur). Estos catálogos fueron obtenidos a través del algoritmo FOF desarrollado por Huchra & Geller (1982). Los autores denominan a estos sistemas tripletes extensos en contraste con los tripletes compactos obtenidos por Karachentseva et al. (1979) que poseen menores separaciones proyectadas entre sus galaxias miembro. Esta diferencia se debe a que los algoritmos de identificación de los sistemas están calibrados de manera diferente, el algoritmo de Karachentseva selecciona sistemas cercanos en distancia proyectada pero que pueden tener diferencias de velocidad radial grande, mientras que el algoritmo FOF selecciona sistemas con diferencia de velocidad radial baja pero cuyas galaxias miembro pueden encontrarse a grandes distancias. Dadas estas diferencias los autores argumentan que la mayor diferencia entre los tripletes extensos y los compactos es que estos últimos están en equilibrio viral, mientras que los tripletes extensos son dinámicamente jóvenes y se encuentran lejos de un estado virializado.

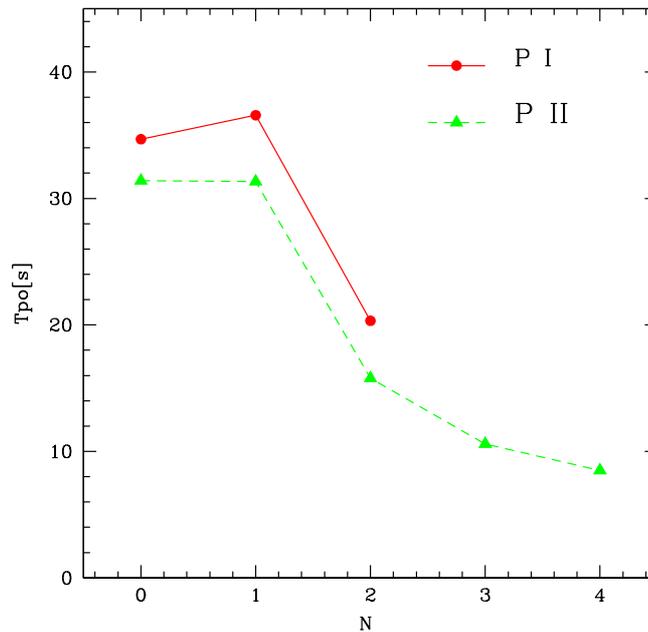
Un trabajo más actual en la identificación de sistemas triples es el de Elyiv et al. (2009), estos autores emplean un método geométrico basado en un mosaico de

Voronoi 3D de alto orden para identificar galaxias aisladas, pares y tripletes. En lo referente a sistemas triples los autores encuentran que los tripletes extensos poseen menor grado de aislamiento por lo que consideran a este tipo de sistemas como configuraciones accidentales dentro del campo. En contraposición los triplete más compactos ( $R_h < 200\text{kpc}$ , siendo  $R_h$  el radio armónico medio) son los más aislados y poseen mayor probabilidad de ser sistemas físicos reales.

### 3.2. Algoritmo de identificación de sistemas triples

En este trabajo se emplean datos espectroscópicos y fotométricos extraídos desde el SDSS-DR7 con la finalidad de detectar sistemas triples de galaxias. El algoritmo de identificación desarrollado tiene en cuenta galaxias cercanas en distancia proyectada en el cielo y en diferencia de velocidad radial más un criterio de aislamiento efectivo para estos sistemas.

Para optimizar el algoritmo de detección se emplearon rutinas del software Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization (HEALPIX, Gorski et al. 2005) con el fin de manejar grandes cantidades de datos como los del SDSS fotométrico. HEALPIX fue desarrollado para el procesamiento de datos y el análisis de las observaciones del fondo cósmico de microondas (CMB). Este procedimiento consiste en una pixelización de igual área de la esfera que se traduce en una estructura versátil para el análisis de datos. Asimismo se emplearon herramientas de paralelización de determinados cálculos dentro del algoritmo a través de la implementación del lenguaje “OpenMP”. Esto permitió reducir el tiempo de cómputo del algoritmo ya que se utiliza la potencia de los diversos procesadores de la máquina en la que se corra el algoritmo. Por ejemplo la figura 3.1 muestra el tiempo de cómputo de la distancia de luminosidad para una muestra de  $\sim 100000$  galaxias, en función del número de núcleos (N), empleando dos procesadores distintos: AMD Athlon(tm) II X2 240e Processor 2 3GiB ram (PI) y AMD Phenom(tm) II X4 955 Processor 4 3GiB ram (PII). Si el valor N es igual a 0, entonces los tiempos que se muestran son aquellos obtenidos de correr el programa en serie. Cuando N es 1,2,3,4 entonces se definió el número de núcleos a utilizar según el valor de N. Desde esta figura se observa que el tiempo de cómputo en serie es menor que al utilizar sólo un núcleo y disminu-



**Figura 3.1:** Tiempo de cómputo de la distancia de luminosidad para una muestra de  $\sim 100000$  galaxias, en función del número de procesadores ( $N$ ), empleando dos procesadores distintos: AMD Athlon(tm) II X2 240e Processor 2 3GiB ram (PI) y AMD Phenom(tm) II X4 955 Processor 4 3GiB ram (PII). Si el valor  $N$  es igual a 0, entonces los tiempos que se muestran son aquellos obtenidos de correr el programa en serie.

ye considerablemente a medida que aumenta  $N$ . También podemos destacar que el tiempo de cómputo para ambos procesadores es similar para un mismo valor de  $N$ .

Los pasos sucesivos del algoritmo desarrollado para la identificación de tripletes de galaxias son:

**Paso 1:** El algoritmo comienza con una selección de candidatos a galaxia central. Se identifica el píxel de cada candidato y se realiza una búsqueda de galaxias que pertenecen a los píxeles adyacentes, dentro del radio de búsqueda. En la primera corrida del algoritmo, cualquier galaxia es considerada candidata a galaxia central.

**Paso 2:** Se consideran como posibles miembros del triplete todos los vecinos de los centros que satisfacen restricciones en distancia proyectada y diferencia de velocidad radial, es decir:  $r_p < r_{pmax}$  y  $\Delta V < \Delta V_{max}$ .

**Paso 3:** Se considera un triplete cuando sólo hay tres galaxias dentro de las restricciones impuestas en el Paso 2.

**Paso 4:** Luego, se asigna el centro a la galaxia más brillante del sistema. Esto puede generar dos tipos de doble identificación:

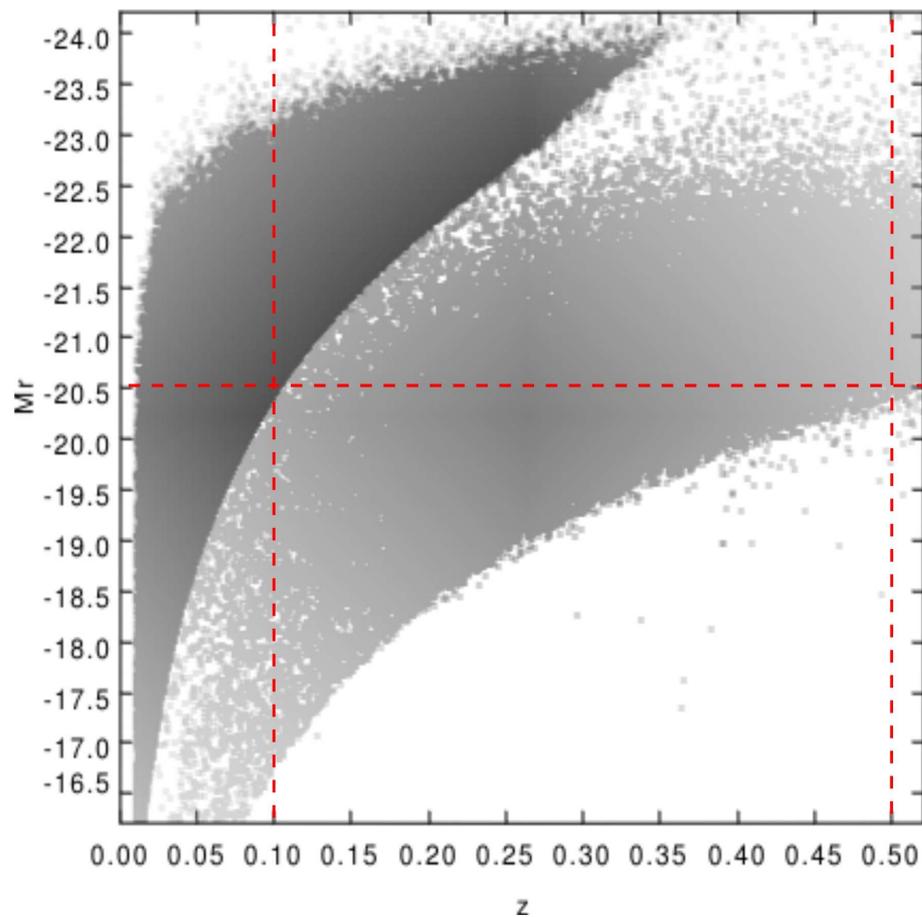
- (a) El centro está asignado a más de un sistema identificado de forma independiente. Esto se debe a que la galaxia más brillante es una galaxia vecina en más de un sistema.
- (b) Un sistema se identifica más de una vez si los diferentes centros satisfacen la condición de miembro, es decir, poseen  $r_p < r_{p\max}$  y  $\Delta V < \Delta V_{\max}$ .

Con el fin de evitar identificación doble, se eliminan los centros repetidos (a) y los centros cercanos (b) se consideraron como un único sistema mediante la adopción de la galaxia más brillante como galaxia central. Este procedimiento genera una nueva muestra de galaxias centrales. Con estos centros como muestra de entrada, el algoritmo vuelve al **Paso 1**.

**Paso 5:** Puede suceder que la nueva galaxia central se encuentre a una distancia mayor que  $r_{p\max}$  o tenga una diferencia de velocidad radial mayor que  $\Delta V_{\max}$  con respecto a alguno de sus vecinos identificados inicialmente. Para recuperar estos sistemas, se considera un segundo conjunto de restricciones, flexibilizando los valores máximos de diferencia de velocidad radial y distancia proyectada y se considera al sistema como triplete si el número de galaxias dentro de las nuevas restricciones es igual a 3.

### 3.2.1. Selección de magnitud absoluta límite, $r_{p\max}$ y $\Delta V_{\max}$

De manera de aplicar este algoritmo a datos del SDSS-DR7 y obtener un catálogo de tripletes de galaxias en un amplio rango de redshift, es necesario trabajar con una muestra completa en volumen. La figura 3.2 muestra la magnitud absoluta en función del redshift para galaxias de la MGS con  $r < 17.77$  y galaxias con información de redshift fotométrico con  $r < 21.5$ . Desde esta figura podemos observar que si se consideran galaxias más brillantes que  $M_r = -20.5$  se puede trabajar con una muestra completa hasta  $z_{\text{spec}} \sim 0.1$  en el caso de datos espectroscópicos y hasta  $z_{\text{phot}} \sim 0.4$  si se incluye información de redshifts fotométricos.



**Figura 3.2:** Distribución de magnitud absoluta en la banda  $r$  como función del redshift para las galaxias de la MGS con  $r < 17.77$  (gris oscuro) y para una muestra aleatoria del un 0.01 % de las galaxias con información de redshift fotométrico con  $r < 21.5$  (gris claro). Las líneas verticales de trazos muestran el redshift límite para el cual una muestra de galaxias con  $M_r < -20.5$  es completa tanto para datos espectroscópicos como para datos fotométricos. La línea horizontal de trazos muestra la magnitud límite ( $M_r = -20.5$ ) para la cual la muestra total es completa.

En lo referente a la distancia proyectada máxima entre galaxias del sistema, Elyiv et al. (2009) encuentra que los tripletes de galaxias más compactos (con un radio armónico  $R_h < 200$  kpc) son los que poseen mayor probabilidad de ser sistemas físicos reales. McConnachie et al. (2008) encuentran, utilizando catálogos sintéticos, que una longitud de enlace  $\ell = 200 h^{-1}$  kpc representa una escala adecuada para identificar grupos compactos. Diversos trabajos relacionados a la identificación de pares de galaxias expresan que la cercanía en distancia proyectada y diferencia de velocidad radial favorece las interacciones. En este sentido es indispensable que la velocidad relativa de las galaxias sea baja ya que en ambientes como cúmulos las altas velocidades de las galaxias en el sistema hacen que las fusiones sean poco probables.

De manera de identificar sistemas triples como entornos que favorecen las interacciones entre galaxias en este trabajo, se seleccionaron inicialmente sistemas triples considerando  $r_{p\max} = 100 h^{-1}$  kpc y  $\Delta V_{\max} = 500 \text{km s}^{-1}$  (Pasos 1 a 3), luego del recentrado (Paso 4) estos valores se modifican a  $r_{p\max} = 200 h^{-1}$  kpc y  $\Delta V_{\max} = 700 \text{km s}^{-1}$  de manera de recuperar los sistemas tipo (b) que no verifican las restricciones originales. Los valores de  $\Delta V_{\max}$  descritos anteriormente se aplican cuando se posee información de redshift espectroscópico. En lo referente a la detección de sistemas utilizando redshift fotométricos, la principal fuente de contaminación es debido al error en  $z_{\text{phot}}$ , ya que la incertidumbre en este parámetro afecta a la elección de  $\Delta V_{\max}$ . El valor del  $r_{p\max}$  es la distancia máxima entre galaxias proyectada en el cielo por lo que no se ve afectado por la incertidumbre en la posiciones relativas entre galaxias en la línea de la visual. Un corte conservativo en la diferencia de velocidad radial máxima entre dos galaxias, calculada utilizando redshifts fotométricos, es considerar  $\Delta V_{\max} = 6800 \text{km s}^{-1}$  (que se corresponde con un valor de  $1\sigma_{\text{phot}}$ ) para la primer corrida del algoritmo y luego del recentrado llevar este valor a  $\Delta V_{\max} = 9310 \text{km s}^{-1}$ , que se corresponde aproximadamente con el incremento de  $500 \text{km s}^{-1}$  a  $700 \text{km s}^{-1}$  impuesto en la identificación de tripletes utilizando redshifts espectroscópicos.

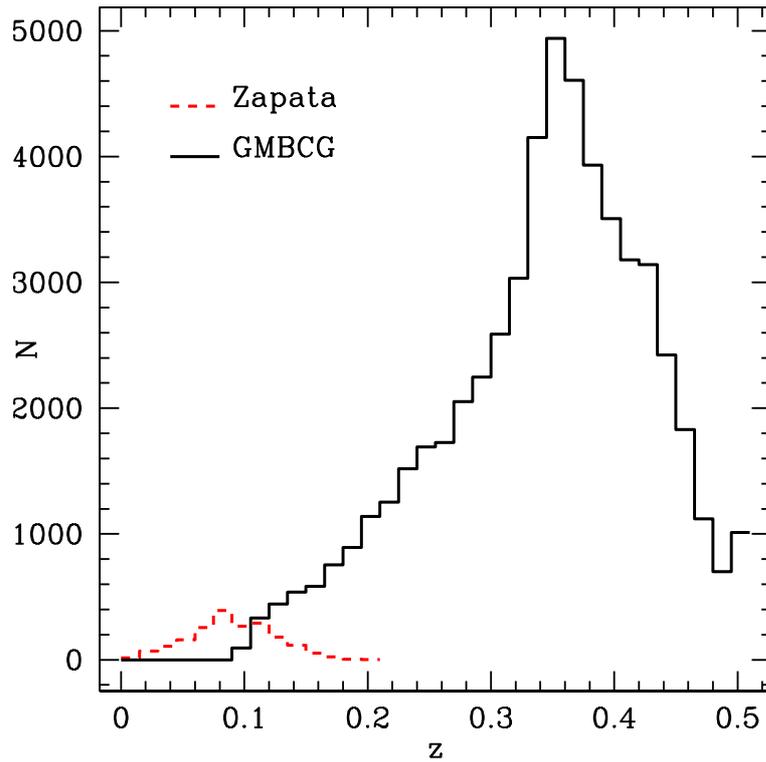
### 3.3. Criterio de aislamiento

Con el fin de construir un catálogo de sistemas triples físicos, es necesario definir un criterio de aislamiento que garantice que la dinámica de estos sistemas no está dominada por estructuras virializadas mayores dentro de las cuales podrían estar inmersos los tripletes. Los criterios de aislamiento consideran generalmente el ambiente local del sistema imponiendo restricciones a la distancia mínima del vecino significativo más cercano. Usualmente se consideran vecinos significativos a las galaxias cercanas que posean luminosidades en un rango definido. En este sentido el aislamiento no es estricto ya que pueden existir en el ambiente del sistema galaxias de menor luminosidad. Sin embargo si el criterio de aislamiento es efectivo entonces la dinámica del sistema estará dominada por las galaxias que lo conformen.

De manera de considerar el ambiente local del triplete se calculará la cantidad de vecinos significativos dentro de  $0.5 h^{-1}\text{Mpc}$  desde el centro del triplete ( $N_{05}$ ), considerando como vecinos significativos a aquellas galaxias más brillantes que  $M_r = -20.5$  y que poseen una diferencia de velocidad radial con respecto al centro del sistema igual que la utilizada para identificar las galaxias miembro del triplete. Luego, un triplete se considera aislado si se verifica  $N_{05} = 3$ . Esta restricción fue adoptada con la finalidad de que dentro de  $0.5 h^{-1}\text{Mpc}$ , la dinámica del sistema esté dominada sólo por las tres galaxias brillantes miembros del triplete.

El límite en magnitud absoluta considerado en la selección de vecinos significativos, se impuso con el fin de seleccionar un criterio de aislamiento que pueda ser aplicado a tripletes a redshift mayores donde, por completitud, la selección de sistemas aislados considerando  $N_{05} = 3$  sólo es posible utilizando galaxias más brillantes que  $M_r = -20.5$ .

Con el fin de caracterizar el ambiente global de los tripletes se estimará la distancia proyectada al cúmulo más cercano ( $d_c$ ) considerando una diferencia de velocidad radial entre los sistemas de  $\Delta V < 1000\text{km s}^{-1}$  en el caso de que ambos sistemas posean redshift espectroscópico y  $\Delta V < 7000\text{km s}^{-1}$  cuando se emplean redshift fotométricos. La distancia al cúmulo más cercano está relacionada con la masa de la región en la que reside una galaxia (González & Padilla, 2009) y es, por consiguiente, un buen estimador del ambiente global. En el cálculo de  $d_c$  se utilizarán



**Figura 3.3:** Distribución de redshift para la muestra de cúmulos derivada desde el catálogo de Zapata et al. (2009) (línea discontinua) y para el catálogo de cúmulos GMBCG (línea continua).

dos catálogos de cúmulos que empalman aproximadamente en  $z = 0.1$ . Para redshift cercanos, una muestra de grupos/cúmulos extraída del catálogo construido por Zapata et al. (2009), actualizado a SDSS-DR7. Además, siguiendo Padilla, Lambas & González (2010), se dio la categoría de cúmulos a aquellos grupos con masas viriales  $M_{vir} > 10^{14} h^{-1} M_{\odot}$ . Para los sistemas a redshift mayores, el catálogo “Gaussian Mixture Brightest Cluster Galaxy” (GMBCG) de Hao et al. (2010), que contiene sistemas identificados en el rango de redshift  $0.1 < z < 0.55$  utilizando la secuencia roja más características particulares de las galaxias más brillantes en cúmulos.

La figura 3.3 muestra la distribución de redshift para la muestra de cúmulos derivada desde el catálogo de Zapata et al. (2009) y para el catálogo de cúmulos GMBCG. Desde esta figura puede observarse que ambas muestras presentan abundancias similares y que empalman aproximadamente en  $z = 0.1$ .

La restricción sobre  $N_{05}$  debería bastar para seleccionar tripletes alejados de cúmulos sin embargo la distancia  $d_c$  será utilizada para verificar que los tripletes no estén inmersos en estructuras mayores que dominen la dinámica y propiedades de las galaxias del sistema.

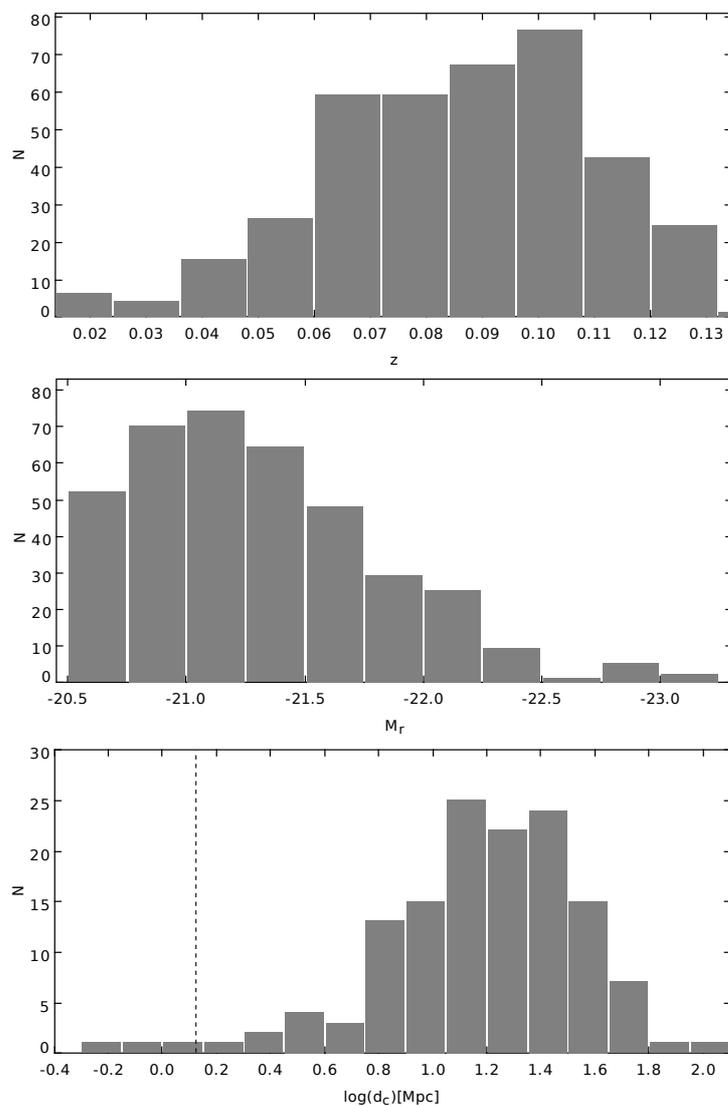
### 3.4. Catálogo de sistemas triples

#### 3.4.1. Tripletes de galaxias a bajo redshift

Para identificar sistemas triples a bajo redshifts ( $0.01 < z < 0.14$ ), se consideran galaxias de la MGS con magnitud aparente  $r < 17.77$  y magnitud absoluta  $M_r < -20.5$ . Dentro de esta muestra también se han considerado galaxias con redshift fotométricos en el rango  $0.09 - \sigma_{phot} < z_{phot} < 0.11 + \sigma_{phot}$  de manera de agregar al catálogo sistemas no identificados debido al efecto de incompletitud por colisión de fibras que afecta a la muestra de galaxias con información espectroscópica. Este efecto será analizado en detalle en el siguiente capítulo.

Sobre estos datos se corrió el algoritmo desarrollado para la identificación de sistemas triples con los parámetros descritos en la sección 3.2.1, y considerando los diferentes valores de  $\Delta V_{max}$  según la galaxia posea redshift espectroscópico o fotométrico. Se identificaron 137 tripletes aislados en el rango de redshift  $0.01 < z < 0.14$ , de los cuales 92 sistemas poseen todos sus miembros con espectroscopía (tripletes espectroscópicos) y 45 nuevos sistemas fueron obtenidos utilizando información de redshift fotométrico. Estos sistemas poseen 1 o 2 galaxias espectroscópicas y las galaxias restantes son fotométricas, por lo que los denominaremos de aquí en adelante tripletes espectro-fotométricos.

La figura 3.4 muestra la distribución de redshift y magnitud absoluta de las galaxias en sistemas triples a bajo redshift, así como la distribución de la distancia al cúmulo más cercano ( $d_c$ ) de estos sistemas. A partir de esta figura se observa que el promedio de magnitud absoluta de las galaxias en tripletes es de  $M_r \sim -21$ , este resultado es esperado debido al límite en magnitud impuesto en la identificación de las galaxias miembro de tripletes. Asimismo puede observarse que el valor promedio de  $d_c$  es de  $16 h^{-1}\text{Mpc}$  para la muestra de tripletes a bajo redshift. Además el 98 % de los sistemas presentan una distancia al cúmulo más cercano mayor que  $1.5 h^{-1}\text{Mpc}$ , que es el radio de Abell de cúmulos masivos y el 95 % de los sistemas se encuentran a distancias mayores que  $3 h^{-1}\text{Mpc}$  de regiones sobredensas. Esto implica que el criterio de aislamiento utilizado es efectivo en seleccionar sistemas que se encuentre alejados de cúmulos de galaxias.

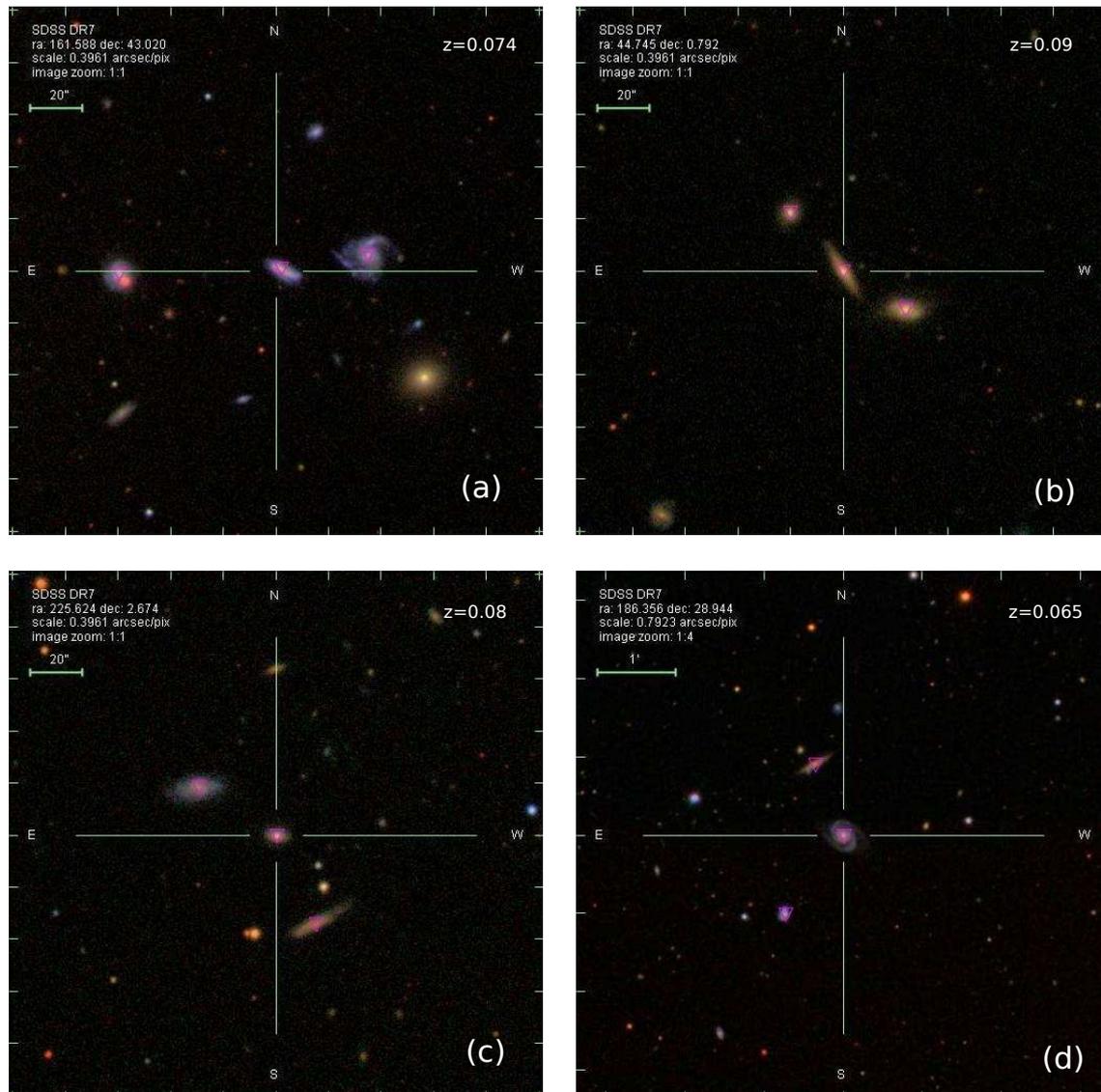


**Figura 3.4:** Distribución de redshift (panel superior) y magnitud absoluta en la banda r (panel intermedio) de las galaxias en tripletes aislados a bajo redshift. El panel inferior muestra la distribución de la distancia al cúmulo de galaxias más cercanos de estos sistemas, la línea vertical de trazos en esta figura se corresponde con el radio de Abell de cúmulos masivos ( $1.5 h^{-1} \text{Mpc}$ ).

El aislamiento de un sistema de galaxias depende del criterio utilizado. En este caso se han definido como vecinos significativos a aquellas galaxias más brillantes que  $M_r = -20.5$  y que poseen una diferencia de velocidad radial con respecto al centro del sistema igual que la utilizada para identificar las galaxias miembro del triplete. Sin embargo pueden existir vecinos más débiles y por lo tanto es necesario obtener una estima del porcentaje de sistemas aislados en este sentido. Para tal fin se empleó una muestra de galaxias de la MGS que posean magnitudes  $M_r < -19.5$ . Luego se calculó el valor de  $N_{05}$  para los tripletes espectroscópicos, considerando estas galaxias como vecinos significativos. Por completitud, este análisis fue realizado en el rango de redshift  $0.01 < z < 0.14$ . Los resultados encontrados fueron que aproximadamente el 50 % de los tripletes no poseen un vecino con magnitud  $M_r < -19.5$  dentro de  $0.5 h^{-1}\text{Mpc}$ , del 50 % restante, 3/4 poseen 1 o 2 vecinos más brillantes que ese límite en magnitud absoluta. Sin embargo si se analiza la distribución  $d_c$  para los tripletes aislados ( $N_{05} = 3$ ), considerando vecinos más brillantes que  $M_r = -20.5$  o vecinos con  $M_r < -19.5$ , no se observan diferencias significativas: los tripletes aislados con ambos criterios se encuentran alejados de regiones sobredensas correspondientes a cúmulos de galaxias.

Las figura 3.5 muestra ejemplos de tripletes espectroscópicos. A partir de estas imágenes puede observarse que los sistemas presentan un alto grado de aislamiento. Así mismo, en la mayoría de los casos, hay signos de interacción evidentes. Las galaxias extra que se observan en estas imágenes no son miembros del triplete ya que poseen o redshifts discordantes (por ejemplo la galaxia elíptica de la imagen (a) y la galaxia en la esquina inferior izquierda de la imagen (b)) o son más débiles que  $M_r = -20.5$ .

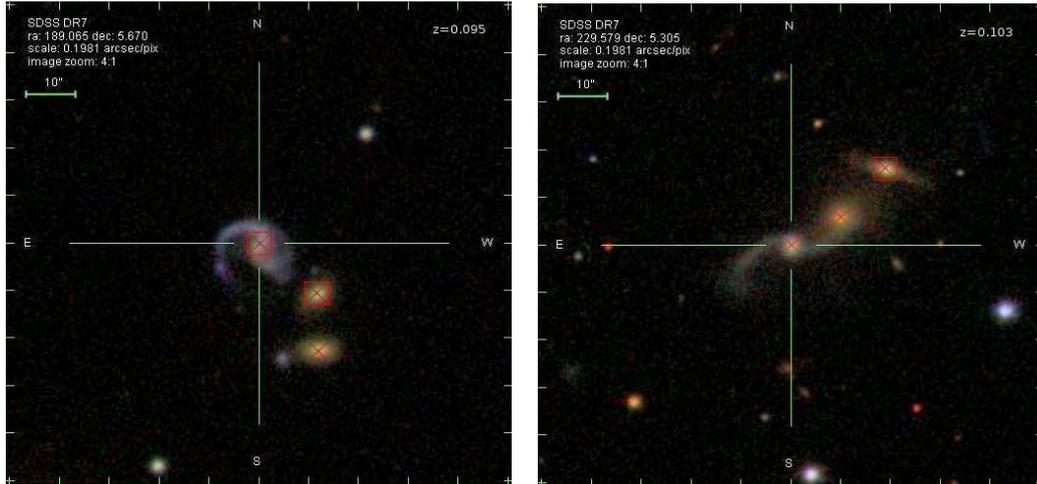
En la figura 3.5 también pueden apreciarse las diferentes clases de sistema triples presentes en la muestra: el triplete de la imagen (a) posee las tres galaxias miembro con colores azules y morfologías tipo disco o irregulares, el triplete de la imagen (b) está formado por galaxias rojas y de morfología de tipo temprano, mientras que los tripletes de las imágenes (c) y (d) presentan una mezcla de morfologías y colores en sus galaxias miembro. Algunas de las galaxias en estos sistemas también presentan modificaciones en su morfología como puentes o distorsiones en los brazos espirales, que pueden estar indicando signos de interacción reciente.



**Figura 3.5:** Ejemplos de tripletes espectroscópicas, las galaxias miembro del triplete están marcadas con un triángulo. Las galaxias extra que se observan en estas imágenes poseen redshifts discordantes o magnitudes mayores que  $M_r = -20.5$

Fuente: <http://cas.sdss.org/dr7/en/>

La figura 3.6 muestra ejemplos de tripletes espectro-fotométricos. A partir de estas imágenes puede observarse que los tripletes que se obtienen al incluir información de redshifts fotométrico poseen un alto grado de aislamiento y en muchos casos las galaxias miembro de estos sistemas poseen signos de interacción, lo que refuerza la categorización de estos sistemas como tripletes físicos reales.



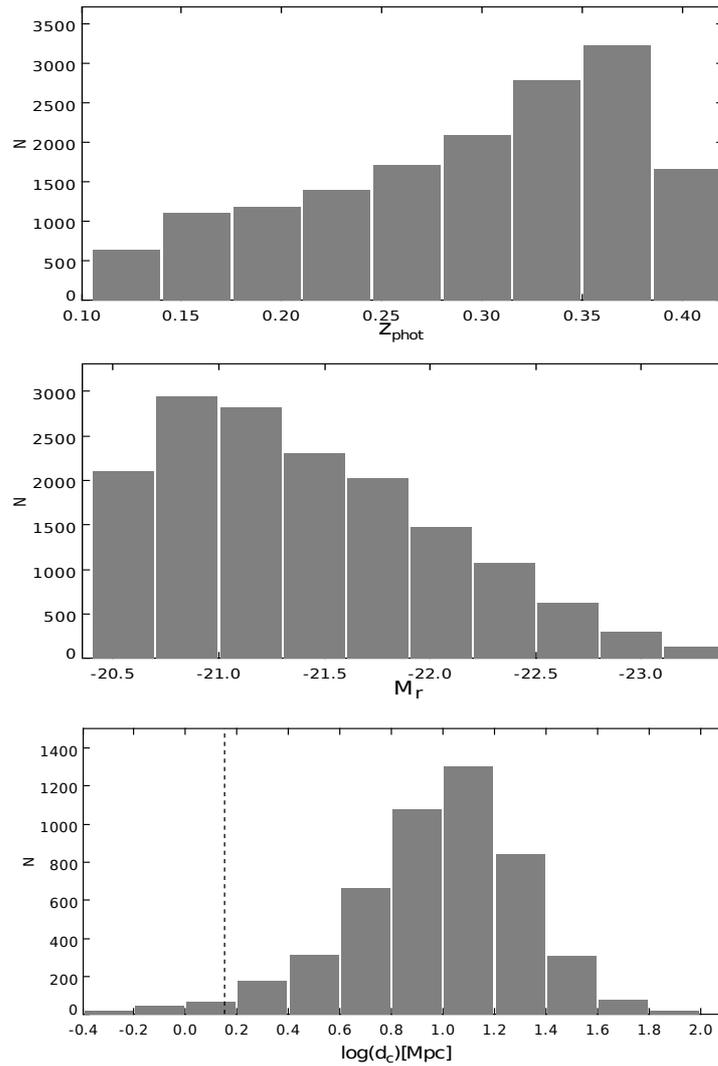
**Figura 3.6:** Imágenes de tripletes espectro-fotométricos con una galaxia miembro con espectroscopía (derecha) y dos galaxias miembro con espectroscopía (izquierda). Las cruces muestran las galaxias del triplete y los cuadrados rojos los objetos que poseen información espectrocópica.  
Fuente: <http://cas.sdss.org/dr7/en>.

### 3.4.2. Tripletes de galaxias a redshifts intermedios

De manera de identificar tripletes a redshifts mayores se ha empleado una muestra que posee galaxias más brillantes que  $r = 21.5$  y  $M_r = -20.5$  con información de redshift fotométrico en el rango  $0.1 < z_{\text{phot}} < 0.5$ . Este rango de redshift fue escogido de manera de considerar el error en el redshift fotométrico en la selección de miembros de tripletes cuyos centros tienen redshifts mayores que  $z = 0.14$ .

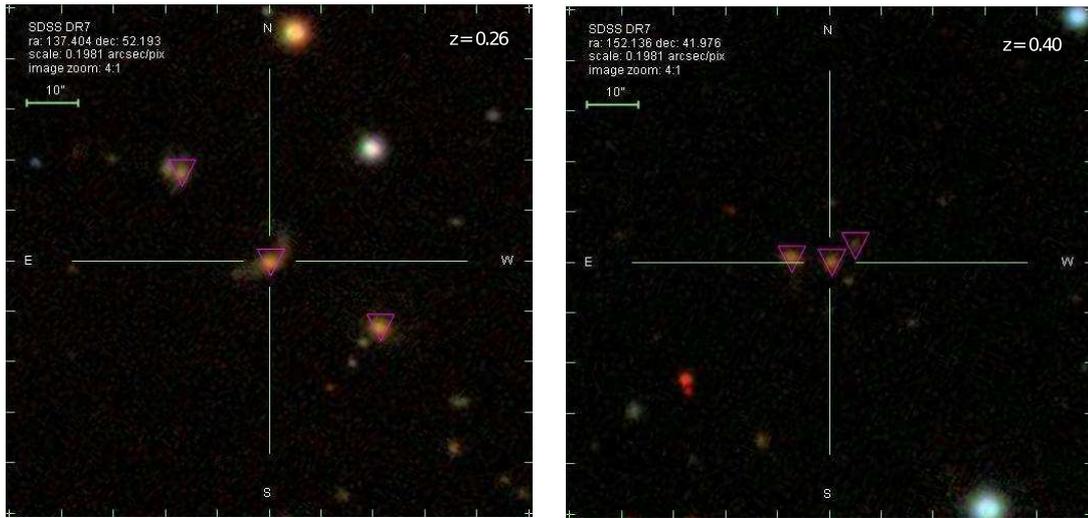
Sobre estos datos se corrió el algoritmo desarrollado para la identificación de sistemas triples con los parámetros descritos en la sección 3.2.1 cuando se utilizan redshifts fotométricos. En el rango  $0.1 \leq z_{\text{phot}} < 0.4$  se obtuvieron 5245 tripletes aislados.

La figura 3.7 muestra la distribución de redshift fotométrico ( $z_{\text{phot}}$ ) magnitud



**Figura 3.7:** Distribución de redshift (panel superior) y magnitud absoluta en la banda r (panel intermedio) de las galaxias en tripletes aislados a redshift intermedio. El panel inferior muestra la distribución de la distancia al cúmulo de galaxias más cercanos de estos sistemas, la línea vertical de trazos en esta figura se corresponde con el radio de Abell de cúmulos masivos ( $1.5 h^{-1}\text{Mpc}$ ).

absoluta en la banda r ( $M_r$ ) de las galaxias en estos sistemas así como la distancia al cúmulo más cercano ( $d_c$ ) para los tripletes identificados a redshift intermedios. De la distribución de redshift se observa que la muestra es completa hasta  $z_{\text{phot}} \sim 0.4$ . La distribución de  $M_r$  muestra que, en promedio, las galaxias de los tripletes a redshift intermedios poseen magnitud  $M_r \sim -21$ , valor igual al encontrado para las galaxias en tripletes a bajo redshift. A partir de la distribución la distancia al cúmulo más cercano se observa que los sistemas se encuentran alejados de regiones sobredensas ya que el valor promedio de  $d_c$  para esta muestra es de  $12 h^{-1}\text{Mpc}$ , además el 97% de los sistemas poseen  $d_c > 1.5 h^{-1}\text{Mpc}$  y el 91% verifican  $d_c > 3 h^{-1}\text{Mpc}$ .



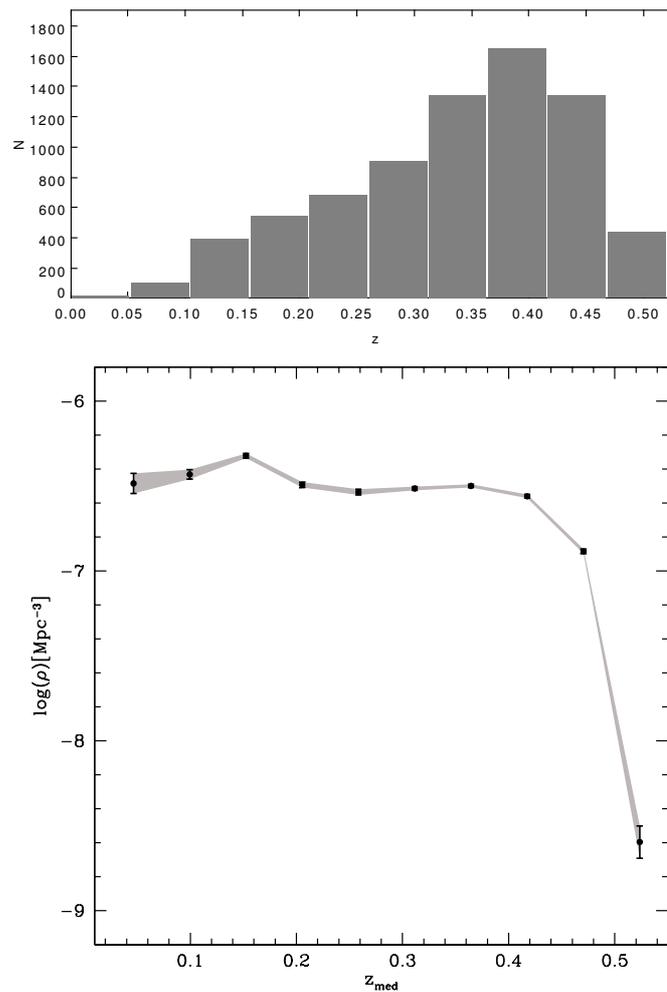
**Figura 3.8:** Ejemplos de tripletes fotométricos, las galaxias miembro del triplete están marcadas con un triángulo. Las galaxias extra que se observan en estas imágenes poseen redshifts discordantes o magnitudes mayores que  $M_r = -20.5$

*Fuente:* <http://cas.sdss.org/dr7/en/>

La figura 3.8 muestra ejemplos de tripletes aislados identificados empleando redshifts fotométricos. En estas imágenes puede observarse que los sistemas identificados presentan un alto grado de aislamiento, las galaxias que los componen poseen diversas morfologías y signos de interacción como puentes o colas tidales, que refuerzan la categorización de los tripletes como sistemas físicos reales.

La figura 3.9 muestra la distribución de redshift y la densidad numérica de sistemas por unidad de megaparsec cúbico, en función del redshift, para la muestra de tripletes aislados en el intervalo  $0.01 \leq z \leq 0.5$ . En esta figura se observa que la densidad numérica presenta un comportamiento constante hasta  $z_{\text{phot}} \sim 0.4$ . Por este motivo se ha restringido la muestra de sistemas triples a redshifts intermedios al rango  $0.11 < z_{\text{phot}} < 0.4$ .

Los resultados obtenidos en este capítulo muestran que los redshift fotométricos proporcionan información muy útil, que permite completar la muestra de sistemas cercanos afectados por el efecto de colisión de fibras del SDSS, así como ampliar la detección de sistemas a mayores distancias, donde los redshifts espectroscópicos no están disponibles de manera completa. Por otro lado los métodos desarrollados son adecuados para generar una muestra homogénea de tripletes de galaxias con una densidad numérica independiente del redshift.



**Figura 3.9:** Distribución de redshift (panel superior) y densidad numérica de tripletes por unidad de volumen comóvil en función del redshift (panel inferior) para la muestra total de tripletes. Las barras de error fueron calculadas utilizando técnicas bootstrap (Efron, B. , 1979).

En este trabajo de Tesis se ha incluido un Apéndice donde se presentan tres tablas que contienen información correspondiente a 10 tripletes seleccionados a partir de cada uno de los catálogos obtenidos: espectroscópicos, espectro-fotométricos y fotométrico, respectivamente. El Apéndice también incluye imágenes de estos tripletes obtenidas desde la base de datos del SDSS-DR7<sup>1</sup>

<sup>1</sup><http://cas.sdss.org/dr7/>

---

# Capítulo 4

## Análisis de completitud y contaminación

---

### 4.1. Generalidades

Uno de los mayores desafíos en el proceso de construcción de un catálogo de sistemas de galaxias a partir de datos obtenidos desde observaciones es poder reducir al mínimo los efectos de proyección, traducidos en la tasa de detección de falsos positivos, y al mismo tiempo, poder maximizar la completitud del catálogo final. En este sentido un algoritmo debe ser capaz de identificar la mayor parte de los sistemas de galaxias reales que contiene la muestra, es decir tener un grado elevado de control sobre la función de selección de estructuras. Poder especificar la contaminación y la pureza de un conjunto de datos es de gran importancia y es un requisito previo a la realización de diversos análisis científicos.

Las simulaciones numéricas y los modelos semianalíticos implementados sobre las mismas, generan catálogos sintéticos que son de gran utilidad a la hora de estimar las tasas de completitud y pureza de catálogos de sistemas de galaxias, en un amplio rango de masas, ya que son representativos del universo real que habitan estas estructuras. Por este motivo, los catálogos sintéticos se transforman en una herramienta de gran valor que puede ser utilizada para medir con precisión la fun-

ción de selección de cualquier algoritmo de agrupamiento de galaxias. Así mismo estos catálogos simulados pueden ser utilizados para definir el mejor conjunto de parámetros del algoritmo de manera de obtener un catálogo con la mayor pureza y completitud posible.

En diversos trabajos de identificación de cúmulos de galaxias el proceso de caracterización de pureza y completitud de los algoritmos se ha realizado a través de la incorporación de grupos simulados en un fondo de datos reales o simulados (Adami et al., 2000; Postman et al., 2002; Kim et al., 2002; Goto et al., 2002; Koester et al., 2007a; Hao et al., 2010). Sin embargo el desarrollo de simulaciones de N-cuerpos de alta resolución, sumado a los modelos semianalíticos implementados sobre las mismas, han permitido ir un paso más allá en el estudio de la función de selección de diversos algoritmos de identificación de cúmulos y grupos de galaxias (Eke et al., 2004; Miller et al., 2005; Yang et al., 2005; Liu et al., 2008; Soares-Santos et al., 2011; Zandivarez et al., 2013). En estos catálogos la distribución de galaxias está diseñada para representar la distribución de materia oscura subyacente y de este modo relacionar la población de cúmulos con su entorno de filamentos y vacíos pudiendo proporcionar estimas realistas de la estructura espacial y de la dinámica de estas estructuras.

En lo referente al análisis de completitud y contaminación de catálogos de sistemas menores de galaxias, McConnachie et al. (2008) han utilizado catálogos sintéticos para estimar la influencia de galaxias intrusas en grupos compactos identificados empleando el criterio de Hickson. Alonso et al. (2004) también utilizaron catálogos sintéticos para estimar la contaminación por pares espurios en una muestra de sistemas en interacción obtenida a partir del catálogo 2dF Galaxy Redshift Survey. Para tal fin los autores realizaron un análisis de excentricidad y de la energía de enlace del sistema de manera de distinguir entre pares reales y falsos.

En el caso de la identificación de sistemas triples, no se ha desarrollado hasta el momento un análisis de la completitud y pureza de los catálogos de tripletes que se encuentran publicados en la literatura. En este capítulo se presenta un estudio de las tasas de pureza y completitud del catálogo de sistemas triples obtenido en este trabajo. Para tal fin se implementará el algoritmo desarrollado para la identificación de tripletes sobre datos con información en tres dimensiones obtenidos desde catálo-

gos sintéticos representativos de la muestra de galaxias del SDSS-DR7, buscando de esta manera relacionar las propiedades tridimensionales del catálogo de tripletes con aquellas obtenidas en el espacio de redshift.

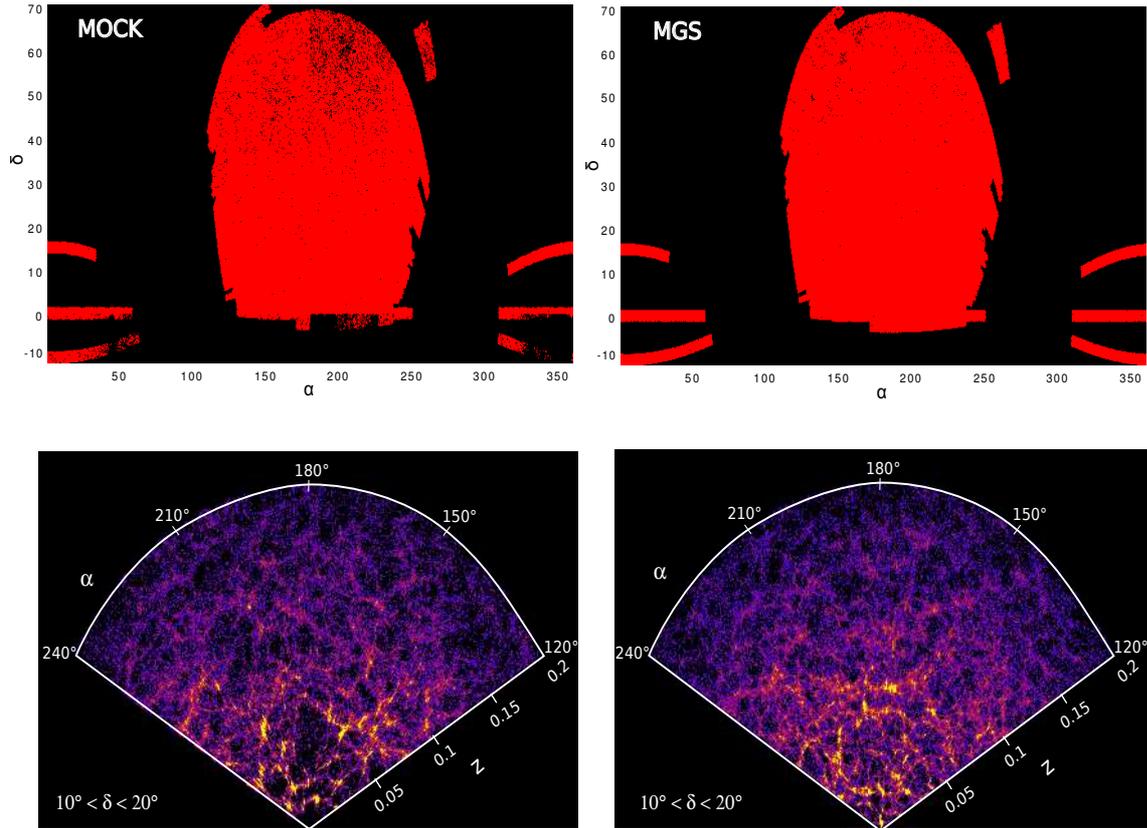
## 4.2. Catálogo sintético

Con el fin de cuantificar las tasas de completitud y pureza del catálogo de sistemas triples obtenido en el capítulo anterior, se ha empleado un catálogo sintético, representativo de la muestra MGS del SDSS-DR7, cortesía del Lic. Mario Agustín Sgró. Este catálogo fue derivado a partir de la simulación “Millennium” (Springel et al., 2005) sobre la que se aplicó el modelo semianalítico de Croton et al. (2006).

La simulación Millennium sigue la evolución de  $2160^3$  partículas de materia oscura en un cubo de  $500 h^{-1}\text{Mpc}$  de largo, desde  $z=127$  hasta el presente. Los parámetros cosmológicos empleados en la simulación son consistentes con los datos del WMAP1 (Spergel et al., 2003). La resolución espacial de esta simulación es de aproximadamente  $5 h^{-1} \text{ kpc}$  que es un valor significativamente menor que la separación promedio entre galaxias en tripletes, por lo que la resolución de la simulación no debería afectar de manera significativa la aplicación del algoritmo de identificación de sistemas triples desarrollado en este trabajo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que pueden existir casos de galaxias muy cercanas que no van a ser resueltas correctamente.

El modelo semianalítico de Croton et al. (2006) es consistente con las observaciones de galaxias a bajo redshift, incluyendo la función de la luminosidad, la historia de formación estelar global, la relación color magnitud e inclusive la relación de Tully-Fisher.

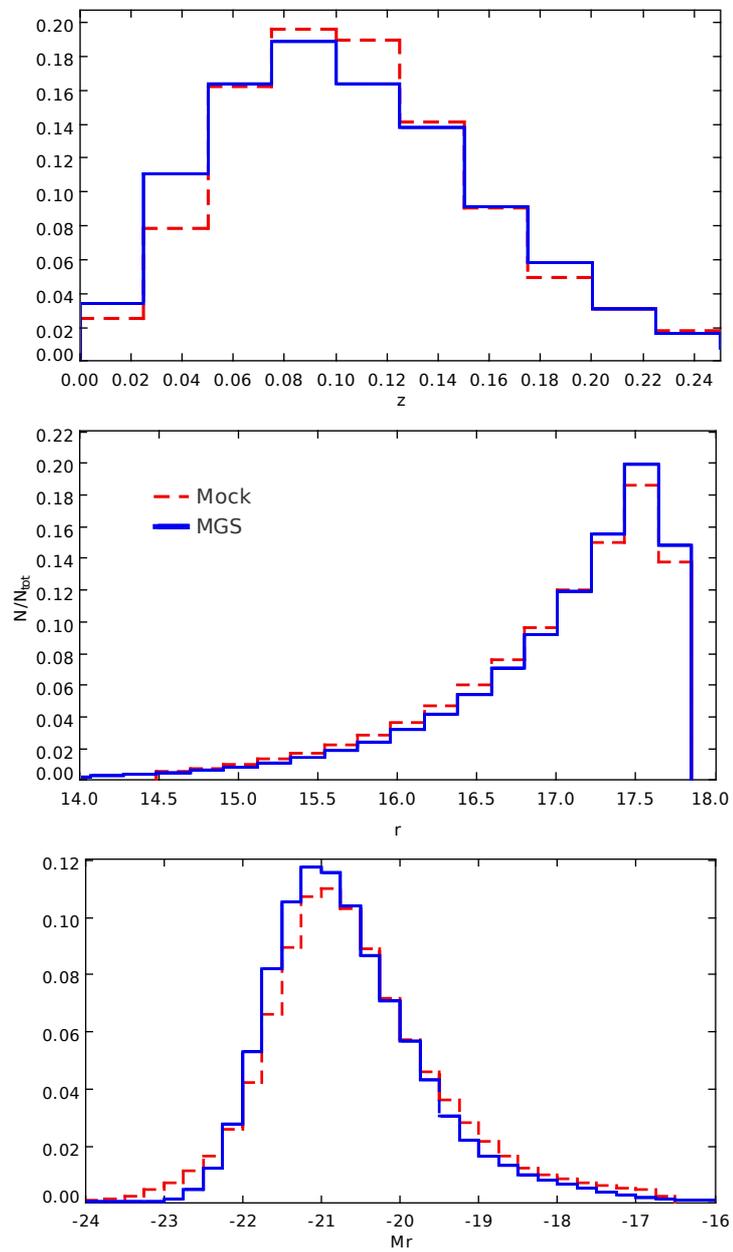
El catálogo sintético comprende 514654 galaxias más brillantes que  $r = 17.77$ , donde  $r$  se corresponde con la magnitud del SDSS en esa banda. Este catálogo contiene, además de la información de la posición de las galaxias en tres dimensiones, ascensión recta, declinación, redshift, velocidad peculiar y magnitud aparente y absoluta en la banda  $r$ . Así mismo cada galaxia posee una identificación del halo de materia oscura al que pertenece y la masa de dicho halo en unidades de masas solares.



**Figura 4.1:** *Panel Superior:* Distribución espacial de ascensión recta y declinación para el catálogo sintético (izquierda) y para la MGS del SDSS-DR7 (derecha). *Panel Inferior:* Distribución en gran escala de las galaxias en el espacio de redshift para el catálogo sintético (izquierda) y para la MGS del SDSS-DR7 (derecha).

De manera de evitar sesgos, debidos a diferencias en las propiedades observacionales de las galaxias de la MGS y el catálogo sintético (Mock), es necesario que este último reproduzca de manera correcta diversas propiedades tales como distribución espacial, de redshift y de magnitudes aparentes y absolutas de las galaxias de la MGS.

La figura 4.1 muestra la distribución espacial en ascensión recta y declinación y la distribución en gran escala de las galaxias en el espacio de redshift, para los datos del Mock y de la muestra MGS. A partir de esta figura se observa que ambas poblaciones de galaxias presentan distribuciones similares. En la figura 4.2 se muestran los histogramas correspondientes a la distribución de redshift, magnitud aparente y magnitud absoluta en la banda  $r$  del Mock y de la MGS. Se aprecia que las distribuciones de estos parámetros presentan buen acuerdo para ambas muestras.

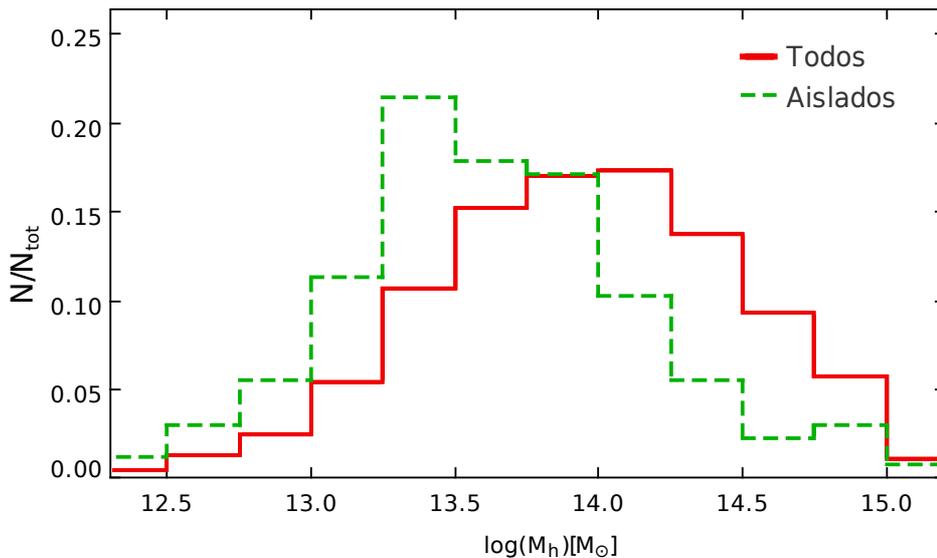


**Figura 4.2:** Distribución de redshif (panel superior), magnitud aparente (panel intermedio) y magnitud absoluta (panel inferior) en la banda  $r$  para muestra MGS del SDSS-DR7 y para el catálogo sintético (Mock).

### 4.3. Análisis de Completitud y Pureza

Para analizar la completitud y pureza de los catálogos de tripletes obtenidos en este trabajo, se consideró una muestra del catálogo sintético limitada en volumen teniendo en cuenta las galaxias más brillantes que  $M_r = -20.5$  en el rango de redshift  $0.01 < z < 0.14$ . Se aplicó el algoritmo a los datos en el espacio real del catálogo sintético y se consideraron tripletes reales a aquellos sistemas cuyas tres galaxias miembro pertenecen al mismo halo de materia oscura. Se identificaron 726 tripletes de los cuales 227 son tripletes aislados, es decir verifican no tener ningún vecino significativo dentro de una distancia real de  $0.5 h^{-1}\text{Mpc}$ . Cabe destacar que al correr el algoritmo en los datos reales no se encontraron sistemas que verifiquen las condiciones anteriores y no se encuentren inmersos en el mismo halo de materia oscura.

La figura 4.3 muestra la distribución de masa del halo de los tripletes reales, el valor promedio de esta cantidad para sistemas aislados es de  $M_h = 3 \times 10^{13} M_\odot$ , mientras que los sistemas sin aislar residen en promedio en halos con masas de aproximadamente  $10^{14} M_\odot$ . En esta figura puede observarse que el criterio de aislamiento es efectivo en seleccionar sistemas que no se encuentren inmersos en halos muy masivos de materia oscura.

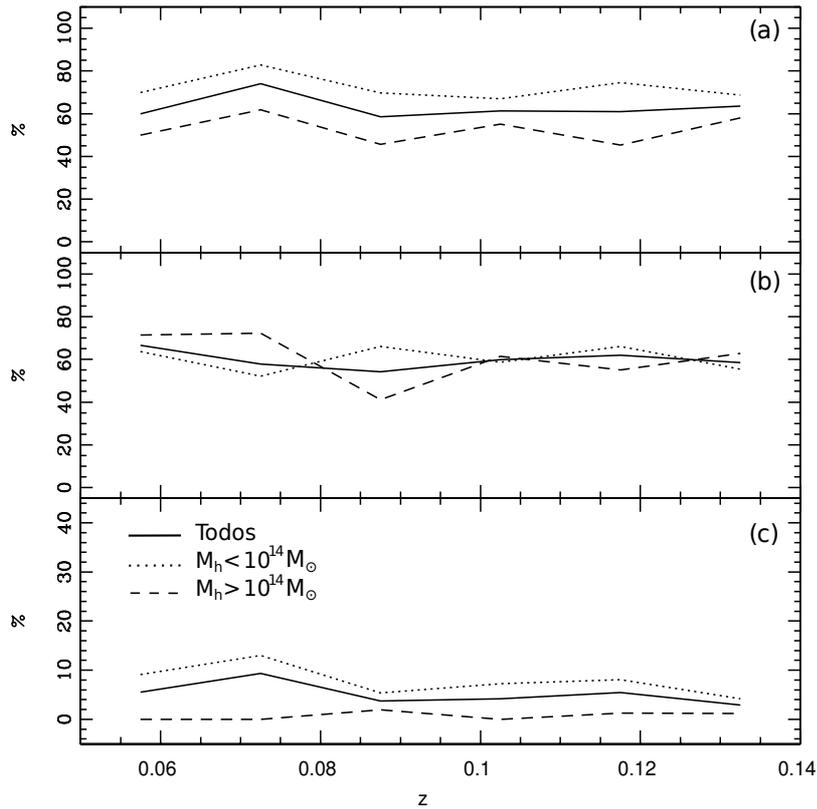


**Figura 4.3:** Distribución de la masa del halo de materia oscura en unidades de masas solares para los tripletes aislados y sin aislar identificados empleando distancias reales en el Mock.

Para estimar las tasas de completitud, pureza y contaminación se aplicará el algoritmo en el espacio de redshift y se analizará la cantidad de sistemas reales que son identificados en el espacio de redshift. Puede ocurrir que el algoritmo aplicado a datos proyectados falle en recuperar todos los tripletes reales y además que se incluyan tripletes en proyección. Considerando estos efectos, en este trabajo, la completitud se define como  $N_{rec}/N_{tot}$ , donde  $N_{rec}$  es número de tripletes recuperados de los  $N_{tot}$  tripletes reales. De manera complementaria, la pureza del catálogo se define como  $N_{rec}/N_{det}$ , donde  $N_{det}$  es el número de tripletes identificados en el espacio de redshift. Al emplear distancias reales en la identificación de tripletes se seleccionan sistemas que son muy compactos en tres dimensiones. Sin embargo pueden existir sistemas identificados en el espacio de redshift cuya separación real entre galaxias sea levemente superior al valor máximo impuesto a la distancia calculada en tres dimensiones. Si estos sistemas poseen todas sus galaxias pertenecientes al mismo halo de materia oscura entonces pueden ser considerados como tripletes menos compactos y no son necesariamente una mera configuración de galaxias en proyección. En este sentido McConnachie et al. (2008) analizaron la identificación de grupos compactos en catálogos sintéticos distinguiendo entre asociaciones compactas y asociaciones de Hickson según la longitud de enlace de los sistemas sea menor o mayor que  $200 h^{-1}$  kpc respectivamente. De manera de tener en cuenta este efecto se ha estimado también la tasa de sistemas espurios como  $N_{sp}/N_{det}$  donde  $N_{sp}$  es el número de sistemas detectados en el espacio de redshift cuyas galaxias no pertenecen al mismo halo de materia oscura.

#### 4.3.1. Tripletes espectroscópicos

Para analizar la completitud y pureza del catálogo de tripletes espectroscópicos se corrió el algoritmo en el espacio de redshift y se identifican en el catálogo sintético 763 tripletes, siendo aislados 341 sistemas. De manera de estimar la completitud y pureza del catálogo espectroscópico se correlacionó la lista de estos sistemas con la lista de sistemas reales. Se considera que un sistema real es recuperado si todas sus galaxias miembro pueden ser identificadas empleando información en el espacio de redshift.



**Figura 4.4:** Tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) como función del redshift para tripletes sin aislar. Se ha distinguido entre sistemas inmersos en halos de materia oscura con masas mayores y menores que  $10^{14}M_{\odot}$ .

Sin considerar el aislamiento se recuperaron 452 sistemas y sólo 36 de los tripletes son considerados espurios, es decir que poseen al menos una galaxia que pertenece a un halo de materia oscura diferente.

La Figura 4.4 muestra la tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) en función del redshift para el catálogo de sistemas sin aislar. Se ha distinguido entre sistemas inmersos en halos de materia oscura con masas mayores o menores que  $10^{14}M_{\odot}$ , que es el valor promedio de la distribución de esta cantidad para sistemas sin aislar.

En esta figura se observa que la completitud es estable para todo el rango de redshift con un promedio del 62%. Para tripletes menos masivos ( $M_h < 10^{14}M_{\odot}$ ) la tasa de completitud asciende hasta el 73% mientras que para tripletes con  $M_h \geq 10^{14}M_{\odot}$  la completitud promedio es del 54%. La pureza del catálogo es estable con el redshift y no difiere significativamente para sistemas inmersos en halos de diferente masa, teniendo un valor promedio aproximado en 60%. La contaminación por sistemas espurios es baja, del orden del 5% para el rango total de masa del halo, del 8%

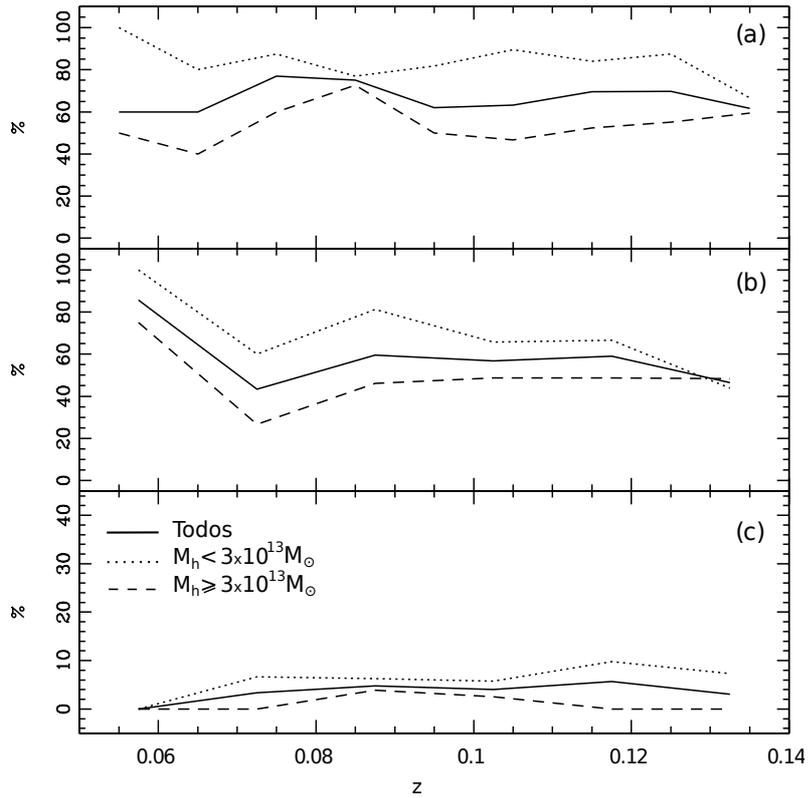
para sistemas inmersos en halos con masas  $M_h < 10^{14} M_\odot$  y disminuye a 0.7 % para sistemas en halos masivos. Este último porcentaje es debido a la baja probabilidad de encontrar una galaxia del triplete perteneciente a otro halo de materia oscura si el sistema se encuentra inmerso en una estructura de mayor masa.

De manera de cuantificar la influencia del criterio de aislamiento en las tasas de completitud, pureza y contaminación por sistemas espurios del catálogo espectroscópico, se realizó una correlación entre la lista de sistemas reales y sistemas identificados en el espacio de redshift que verifiquen el criterio de aislamiento. De este modo de los 341 tripletes aislados 185 son sistemas reales y 15 son considerados espurios en el sentido que no todas las galaxias del sistema pertenecen al mismo halo de materia oscura.

La Figura 4.5 muestra la tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) en función del redshift para el catálogo de sistemas aislados. Considerando el valor medio de la distribución de masa del halo de materia oscura que contiene a estos sistemas, se ha distinguido entre tripletes inmersos en halos de materia oscura con masas mayores o menores que  $3 \times 10^{13} M_\odot$ . Desde esta figura podemos ver que la completitud es estable para todo el rango de redshift con un promedio del 67 %, similar al encontrado para sistemas sin aislar. Sin embargo la completitud del catálogo alcanza un valor promedio del orden del 85 % para tripletes en halos menos masivos. Los sistemas inmersos en halos con masas mayores que  $3 \times 10^{13} M_\odot$  presentan una tasa de completitud del 54 %.

La pureza del catálogo es mayor para sistemas con  $z < 0.75$  pero se mantiene estable en todo el rango de redshift restante. Los valores promedio de pureza obtenidos para todo el rango de masas del halo y para sistemas con halos con masas menores y mayores que  $3 \times 10^{13} M_\odot$  son 58 %, 70 % y 49 % respectivamente. La contaminación por sistemas espurios no difiere significativamente para sistemas inmersos en halos de diferente masa siendo estable con el redshift en un valor promedio del orden del 3.5 %

Del análisis de las tasas de completitud, pureza y contaminación por sistemas espurios se puede concluir que el criterio de aislamiento incrementa la calidad del catálogo final de sistemas triples a bajo redshift obtenido empleando información de distancias derivadas desde la espectroscopía.

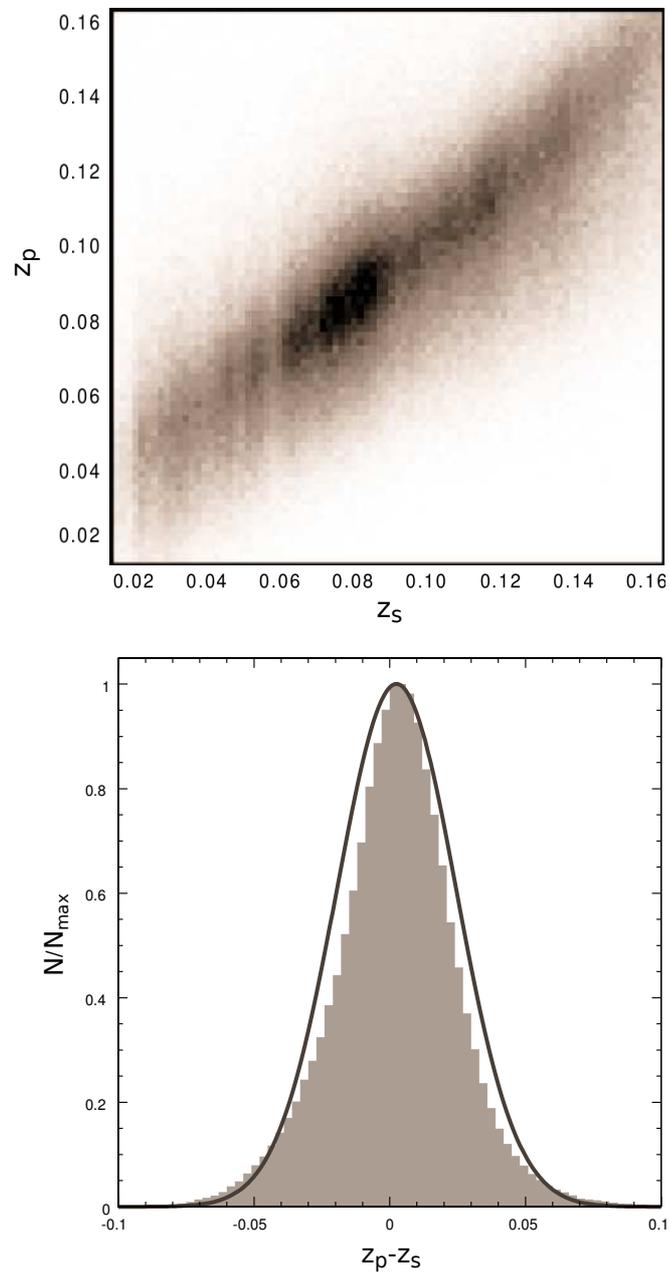


**Figura 4.5:** Tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) como función del redshift para tripletes aislados. Se ha distinguido entre sistemas inmersos en halos de materia oscura con masas mayores y menores que  $3 \times 10^{13} M_{\odot}$ .

#### 4.3.2. Contaminación debida al error en $z_{\text{phot}}$

En la utilización de datos fotométricos hay que tener en cuenta que la principal fuente de contaminación en la detección de los sistemas se debe al error en el redshift fotométrico que se refleja en la elección de  $\Delta V_{\text{max}}$ . El panel superior de la figura 4.6 muestra un gráfico de densidad de la relación entre el redshift espectroscópico ( $z_s$ ) y el redshift fotométrico ( $z_p$ ) para la muestra MGS del SDSS-DR7. Desde esta figura se observa que a pesar de existir una dispersión amplia entre las dos estimas de redshift, en promedio existe una buena correlación en la relación uno a uno. El panel inferior de la figura 4.6 muestra la distribución normalizada de la diferencia  $z_p - z_s$  y la línea continua representa una gaussiana centrada en cero y con dispersión igual al error dado por O'Mill et al. (2011) para las estimas del redshift fotométrico ( $\sigma_{\text{phot}} = 0.0227$ ).

Para evaluar la completitud y contaminación del catálogo de sistemas triples, generado utilizando información de redshift fotométricos, se procedió a modificar los



**Figura 4.6:** Panel Superior: Relación entre el redshift espectroscópico ( $z_s$ ) y el redshift fotométrico ( $z_p$ ) para la muestra MGS del SDSS-DR7. Panel Inferior: Distribución normalizada de la diferencia  $z_p - z_s$ . La línea continua representa una gaussiana centrada en cero y con dispersión igual  $\sigma_{phot} = 0.0227$ .

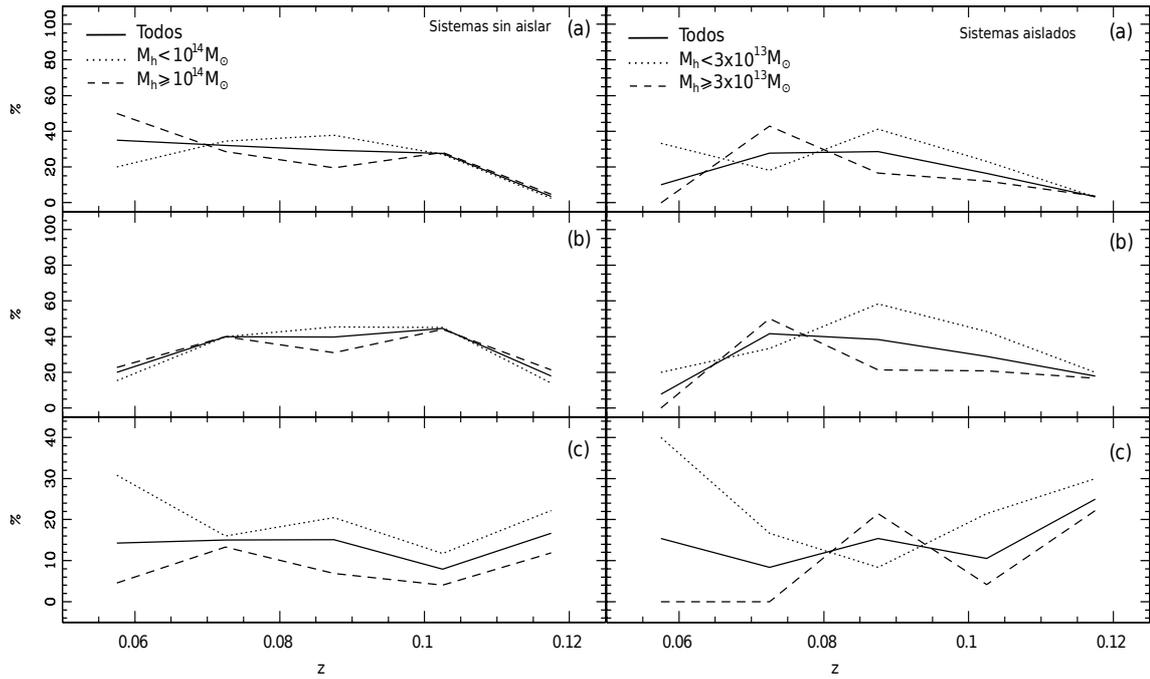
redshifts de las galaxias del catálogo sintético a través de una asignación aleatoria de errores a los redshift según la distribución gaussiana que representa las diferencias entre los valores de redshift espectroscópicos y fotométricos de la MGS.

Sobre estos datos se corrió el algoritmo en el espacio de redshift fotométricos. Se consideraron diversos valores de  $\Delta V_{max}$  de acuerdo a que este valor se corresponda con  $1\sigma_{phot}$ , con  $1.5\sigma_{phot}$  o con  $2\sigma_{phot}$ . Sin embargo al considerar valores menos restrictivos en la diferencia de velocidad radial de las galaxias ( $1.5\sigma_{phot}$  o  $2\sigma_{phot}$ ), se incluyen muchas galaxias de fondo que hacen que los sistemas triples reales sean identificados como sistemas con más de tres galaxias, recuperándose únicamente alrededor del 10% de los sistemas reales. El porcentaje de sistemas recuperados es mayor al considerar  $\Delta V_{max} = c \sigma_{phot}$ , que es el valor utilizado en la construcción del catálogo de sistemas triples a redshift intermedio, empleando información de redshift fotométricos. Por este motivo en esta sección analizaremos las tasas de completitud, pureza y contaminación por sistemas espurios empleando estos valores en la identificación de tripletes utilizando el modelo de redshift fotométricos en el catálogo sintético.

Sin considerar el aislamiento se obtienen un total de 327 sistemas triples en el espacio de redshift fotométrico de los cuales 112 son tripletes reales y sólo 44 son espurios en el sentido que al menos una de las galaxias miembro no pertenece al mismo halo de materia oscura. Al aislar los sistemas se obtienen 118 tripletes en el espacio de redshift de los cuales 33 son sistemas reales y 19 son sistemas espurios.

La figura 4.7 muestra las tasas de completitud, pureza y contaminación por sistemas espurios en función del redshift para los tripletes sin aislar y para los tripletes aislados identificados empleando el modelo de redshift fotométrico implementado sobre el Mock. Se ha considerado el rango total de masas del halo de materia oscura y dos sub-muestras según los sistemas residan en halos con masas mayores o menores que  $10^{14}M_{\odot}$  para el caso de sistemas sin aislar y masas mayores o menores que  $3 \times 10^{13}M_{\odot}$  para tripletes aislados.

A partir de esta figura se observa que la completitud es del orden del 30% para sistemas sin aislar y del 20% para tripletes aislados, para todo el rango de redshift y sin fuertes variaciones con la masa del halo de materia oscura en el que el sistema se encuentra inmerso. La pureza del catálogo es estable con el redshift



**Figura 4.7:** Tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) como función del redshift para tripletes identificados modelando el error del redshift fotométrico. Izquierda: Sistemas sin aislar. Derecha: Tripletes aislados.

y no difiere significativamente para sistemas inmersos en halos de diferente masa, teniendo un valor promedio aproximado en 38 % para sistemas sin aislar y del 30 % para sistemas aislados. La contaminación por sistemas espurios para sistemas sin aislar es del orden del 15 % para el rango total de masa del halo y alcanza un valor promedio del 20 % para sistemas inmersos en halos con masas  $M_h < 10^{14} M_\odot$ , en todo el rango de redshift. Para sistemas en halos masivos, la contaminación por sistemas espurios disminuye al 8 %. En el caso de sistemas aislados la contaminación por sistemas espurios es similar, presentando valores promedio del 15, 23 y 10 % para el intervalo total de masa y para las sub-muestras de sistemas menos y más masivos, respectivamente.

Estos resultados indican que los errores asociados a los redshifts fotométricos poseen gran influencia en la identificación de sistemas triples, disminuyendo significativamente las tasas de completitud y pureza del catálogo final. Sin embargo los valores obtenidos en este trabajo están en acuerdo con los obtenidos en la literatura para sistemas de galaxias. Por ejemplo McConnachie et al. (2008) encuentran que sólo el 30 % de las asociaciones identificadas aplicando el criterio de Hickson, sobre los datos de un catálogo sintético, son sistemas compuestos por cuatro o más miem-

bros que no incluyen ninguna galaxia intrusa y pueden ser considerados físicamente densos. Por otro lado Zandivarez et al. (2013) utilizan un catálogo sintético para caracterizar las tasas de completitud y pureza del algoritmo PFOF de Liu et al. (2008) (que es una modificación del algoritmo FOF clásico) cuando se emplean redshifts fotométricos obtenidos a través del código “Bayesian Photometric Redshift” (BPZ, Benítez, 2000). Estos autores encuentran que la pureza y completitud para grupos que poseen 100 % de las galaxias identificadas en el espacio de redshift, que también son galaxias miembro del grupo en el espacio real, es menor que el 20 % para todo el rango de redshift analizado.

### 4.3.3. *Imcompletitud por colisión de fibras*

El espectrógrafo del SDSS utiliza fibras conectadas manualmente en placas que se colocan en el plano focal del telescopio. Las posiciones de estas fibras se asignan a través de un algoritmo de mosaico (Blanton et al., 2003) diseñado para optimizar la observación de estructuras a gran escala. Dos fibras no pueden colocarse a distancias menores que  $55''$  (Strauss et al., 2002), por este motivo para dos objetos con la misma prioridad (por ejemplo, dos galaxias MGS) y cuyos centros se encuentran a menos de  $55''$ , el algoritmo selecciona al azar la galaxia que se observará espectroscópicamente. Hay regiones en las que las placas se superponen (alrededor del 30 % de las regiones de mosaico), dentro de las cuales ambos objetos pueden ser observados. Debido a este efecto denominado colisión de fibras la muestra espectroscópica del SDSS es incompleta, esto quiere decir que por más que el límite de magnitud aparente del SDSS para objetos espectroscópicos es  $r = 17.77$  no todas las galaxias más brillantes que este límite son observadas espectroscópicamente.

El problema de incompletitud por colisión de fibras se vuelve más importante en el análisis de sistemas de galaxias compactos, ya que  $55''$  de arco se corresponde con  $100 h^{-1}$  kpc a un redshift  $z \sim 0.1$ . Esto implica que a partir de este redshift el algoritmo fallará en detectar sistemas triples cuyas galaxias miembro se encuentren a distancias menores que  $100 h^{-1}$  kpc.

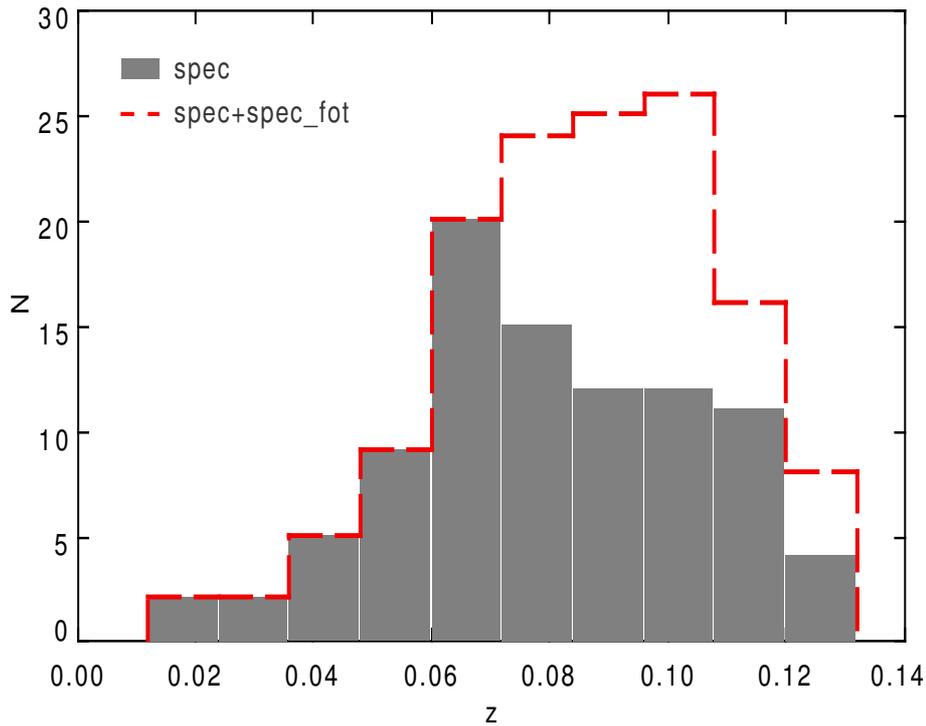
Por este motivo, se ha considerado la incompletitud debido a la colisión de fibras en la detección de sistemas triples. Para cuantificar este efecto se ha utilizado una

submuestra de la MGS que considera galaxias con  $r < 17.77$  con redshifts derivados del espectro en el rango  $0.09 < z_{\text{spec}} < 0.14$  que es el rango de redshift más afectado por incompletitud por colisión de fibras. A esta muestra se han agregado galaxias más brillantes que el límite espectroscópico ( $r = 17.77$ ) con redshifts fotométricos en el rango  $0.09 - \sigma_{\text{phot}} \leq z_{\text{phot}} \leq 0.11 + \sigma_{\text{phot}}$  y que no poseen mediciones espectroscópicas.

Sobre estas muestras se corre el algoritmo para cada galaxia espectroscópica considerando también sus vecinos fotométricos. Mediante el empleo de estos datos, fotométricos y espectroscópicos, encontramos que el 90 % de los tripletes aislados espectroscópicos pueden ser recuperados. Los sistemas que se pierden incluyen aquellos que no verifican el criterio de aislamiento debido a la inclusión de galaxias brillantes sin espectroscopía.

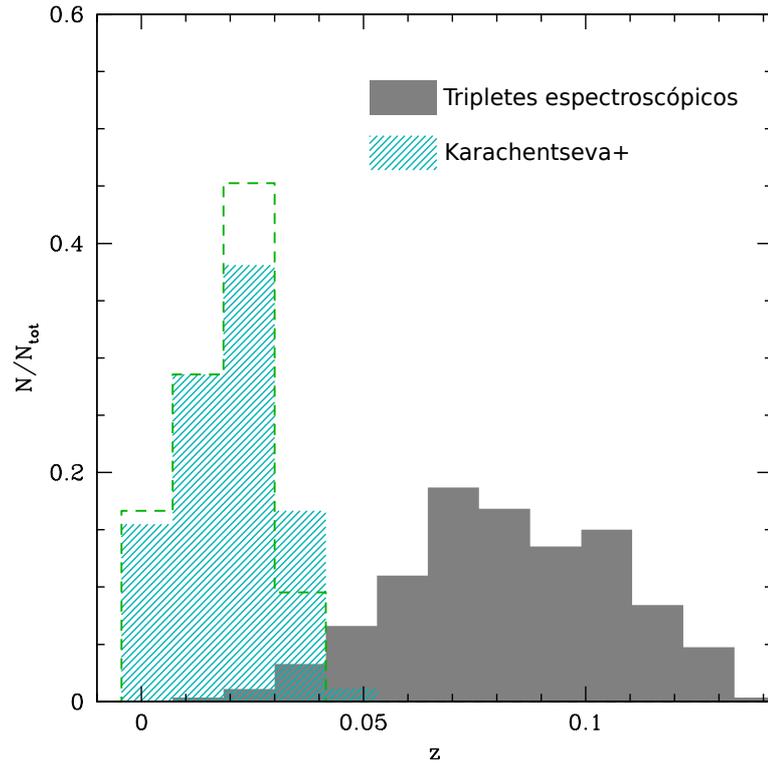
Se identificaron 45 nuevos tripletes con 1 o 2 miembros sin información espectroscópica que son los incluidos en el catálogo de tripletes espectro-fotométricos. Se realizó una inspección visual de estos sistemas encontrándose que la mayoría presentan un alto grado de aislamiento así como signos de interacción evidentes tales como puentes y colas tidales. En este sentido Mesa et al. (2014) encuentran que el empleo de redshift fotométricos en la identificación de pares tidales de galaxias es de gran utilidad para incluir mayor cantidad de sistemas a la muestra analizada y de este modo mejorar la precisión de la estadística.

La figura 4.8 muestra la distribución de redshift de los tripletes espectroscópicos (spec) y de la muestra incluyendo tripletes espectroscópicos y espectro-fotométricos (spec+spec\_fot). Podemos observar que la distribución de tripletes que poseen las tres galaxias miembro con espectroscopía crece hasta  $z \sim 0.07$  y, a partir de este valor, la distribución cae debido principalmente al efecto de incompletitud por colisión de fibras. Sin embargo cuando se incluyen los tripletes espectro-fotométricos la distribución de redshift crece hasta  $z \sim 0.11$ . Estos resultados sugieren que el empleo de redshift fotométricos es de gran utilidad para completar la muestra de sistemas triples a bajo redshift donde el efecto por colisión de fibras es evidente.



**Figura 4.8:** Distribución de redshift de la muestra de tripletes espectroscópicos (spec) y la muestra de estos sistemas incluyendo los tripletes espectro-fotométricos (spec+spec\_fot).

Los resultados encontrados en este capítulo sugieren que la muestra de tripletes a redshift intermedio obtenida a través de la utilización de redshifts fotométricos se encuentra sujeta a un alto grado de contaminación debido a los errores en estas estimas. Sin embargo esta muestra contiene sistemas triples candidatos a realizar seguimiento espectroscópico de las galaxias miembro identificadas de manera de confirmar a estos sistemas como tripletes reales. Por este motivo en el resto de esta tesis se realizará un análisis detallado de las propiedades de los sistemas triples y de las galaxias que los conforman, considerando la muestra de tripletes identificados empleando información de redshift espectroscópico. Esta muestra comprende un avance importante en el análisis estadístico de sistemas triples ya que la muestra “Isolated Triplets of galaxies” de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988) (de aquí en adelante Karachentseva+), que es la más analizada hasta la actualidad, está formada por galaxias del universo local. En esta muestra de 84 tripletes aproximadamente la mitad de los sistemas se encuentran aislados (indicador de aislamiento del catálogo igual a (+++)) y poseen sus tres galaxias con redshift concordante ( $\Delta V_{rms} < 1000 \text{ km s}^{-1}$ ). Ninguno de estos sistemas se encuentra incluido en la muestra de tripletes espectroscópicos.



**Figura 4.9:** Distribución de redshift de la muestra de tripletes espectroscópicos y de la muestra tripletes del catálogo “Isolated Triplets of galaxies” de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988). La línea de trazos en esta figura representa los sistemas de esta última muestra que poseen  $\Delta V_{rms} < 1000 \text{ km s}^{-1}$  e indicador de aislamiento (+++).

La figura 4.9 muestra la distribución de redshift para la muestra de tripletes espectroscópicos y para los sistemas de la muestra de Karachentseva+. La línea de trazos en esta figura representa la distribución de sistemas reales (aislados y con galaxias miembro con redshifts concordantes). Se observa que la muestra de Karachentseva+ abarca el rango  $0 < z < 0.05$ , con valor promedio en  $z \sim 0.02$  mientras que la muestra de tripletes espectroscópicos se extiende entre  $0.01 < z < 0.14$ , con valor promedio en  $z \sim 0.08$ . Cabe destacar que sólo aproximadamente un 30% de las galaxias de los tripletes reales de la muestra de Karachentseva+ poseen observaciones espectroscópicas en el SDSS-DR7, por lo que la potencialidad estadística de este catálogo no puede ser aprovechada en el análisis de las propiedades de las galaxias de esta muestra de tripletes.



---

# Capítulo 5

## Análisis de configuraciones y dinámica

---

### 5.1. Generalidades

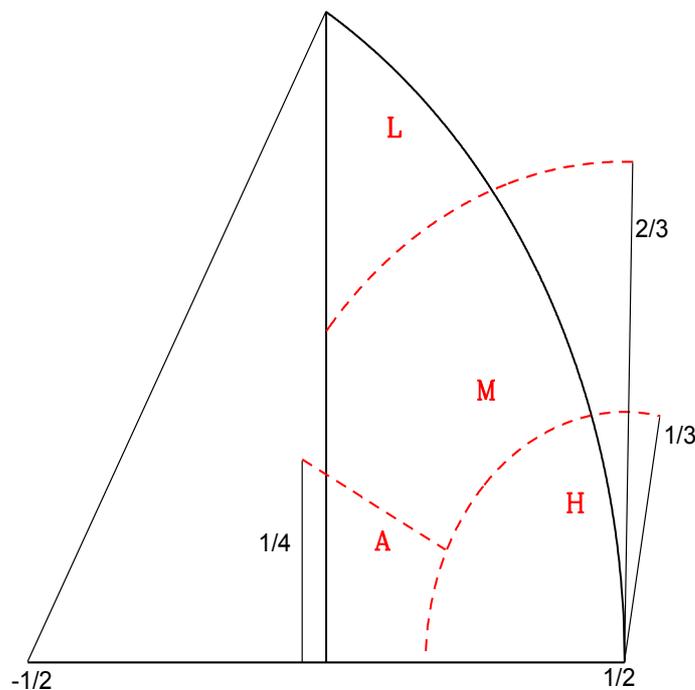
La configuración de un sistema triple, es decir la forma del triángulo formado por las galaxias, es una característica importante en el análisis de la evolución dinámica del sistema. Agekyan & Anosova (1968) sugirieron una forma elegante para analizar las propiedades geométricas de sistemas triples. Esta se basa en realizar una serie de transformaciones de manera que las coordenadas  $(x, y)$  de las dos galaxias más alejadas entre sí que conforman el lado más largo de triángulo, sean  $(-0.5, 0)$ ,  $(0.5, 0)$  entonces la configuración del triplete queda definida por las coordenadas  $(x, y)$  de la tercer galaxia que deben verificar  $x \geq 0$ ;  $y \geq 0$  y  $(x + 0.5)^2 + y^2 \leq 1$ . Se llamará de aquí en adelante a este esquema mapa-AA. Este mapa ha sido utilizado por diversos autores para caracterizar la configuración de sistemas triples de galaxias y analizar su relación con diversas propiedades dinámicas de estos sistema (Chernin et al., 1994; Aceves, 2001).

Mediante un análisis geométrico de las configuraciones de los tripletes en el mapa-AA, un triángulo que posee lados aproximadamente iguales se encontrará representado por un punto en la esquina superior del mapa, un triángulo con un lado mucho

más pequeño que los otros dos se ubicará en la esquina inferior derecha del mapa-AA y las configuraciones lineales se encontrarán en la parte inferior del mismo. Según estas consideraciones geométricas se pueden definir 4 áreas características en el mapa-AA:

- **L:** área lagrangiana del mapa donde se ubican los puntos  $(x, y)$  que verifican  $(x - 0.5)^2 + y^2 \geq 2/3$ . En esta zona se ubican los sistemas cuyas configuraciones son semejantes a un triángulo equilátero.
- **H:** área jerárquica del mapa definida por los puntos  $(x, y)$  que verifican  $(x - 0.5)^2 + y^2 \geq 1/3$ . En esta zona habitan los sistemas formados por un par cercano más una galaxia extra ubicada a mayor distancia
- **A:** área lineal del mapa representada por los puntos  $(x, y)$  que verifican  $y \leq -0.5x + 1/4$ . Esta es la zona de sistemas que poseen sus tres galaxias alineadas.
- **M:** área intermedia que se ubica entre las tres áreas definidas anteriormente.

En la figura 5.1 se observa un esquema del mapa-AA.



**Figura 5.1:** Esquema del mapa-AA donde se muestran las distintas áreas que corresponden a diferentes posibles configuraciones de tripletes: (L) Lagrangiana, (H) Jerárquica, (A) Lineales y (M) intermedia.

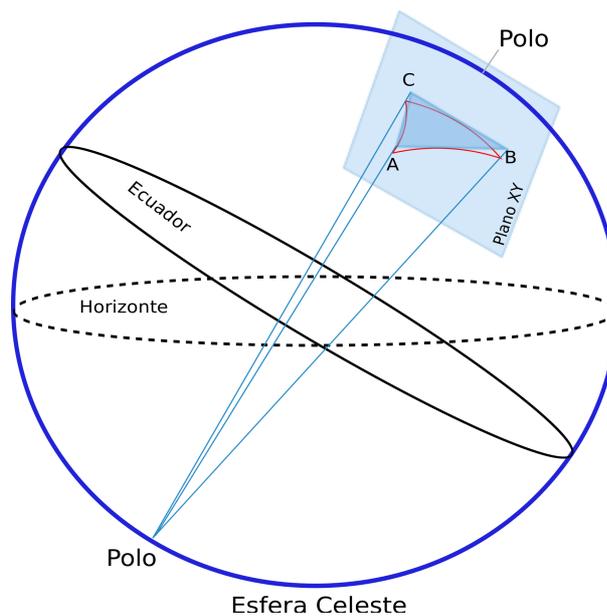
De manera de llevar las coordenadas de ascensión recta y declinación de las galaxias en el triplete a un sistema de referencia consistente con el mapa-AA es necesario realizar una serie de transformaciones de dichas coordenadas. El primer paso es llevar las coordenadas de posición en la esfera a un sistema de coordenadas  $(x, y)$  en el plano. Consideramos un plano tangente a una latitud cualquiera, para un determinado lugar, pueden determinarse las coordenadas planas  $(x, y)$  de un punto celeste cualquiera utilizando las fórmulas de Félix Aguilar para una proyección oblicua:

$$x = \frac{-2 \cos\delta \operatorname{sen}\alpha}{1 + \operatorname{sen}\varphi_0 \operatorname{sen}\delta + \cos\varphi_0 \cos\delta \cos\alpha}$$

$$y = \frac{2 (\cos\varphi_0 \operatorname{sen}\delta - \operatorname{sen}\varphi_0 \cos\delta \cos\alpha)}{1 + \operatorname{sen}\varphi_0 \operatorname{sen}\delta + \cos\varphi_0 \cos\delta \cos\alpha}$$

donde  $\varphi_0$  es la latitud del lugar (en este caso es la latitud del observatorio del SDSS) y  $\alpha$  y  $\delta$  son ascensión recta y declinación del astro.

La proyección estereográfica oblicua es una proyección sobre un plano perpendicular a la esfera celeste que es conforme, esto significa que si dos curvas sobre la superficie de la esfera se cortan en un determinado ángulo, sus proyecciones se cortan en el mismo ángulo. La figura 5.2 muestra un esquema de este tipo de proyección.

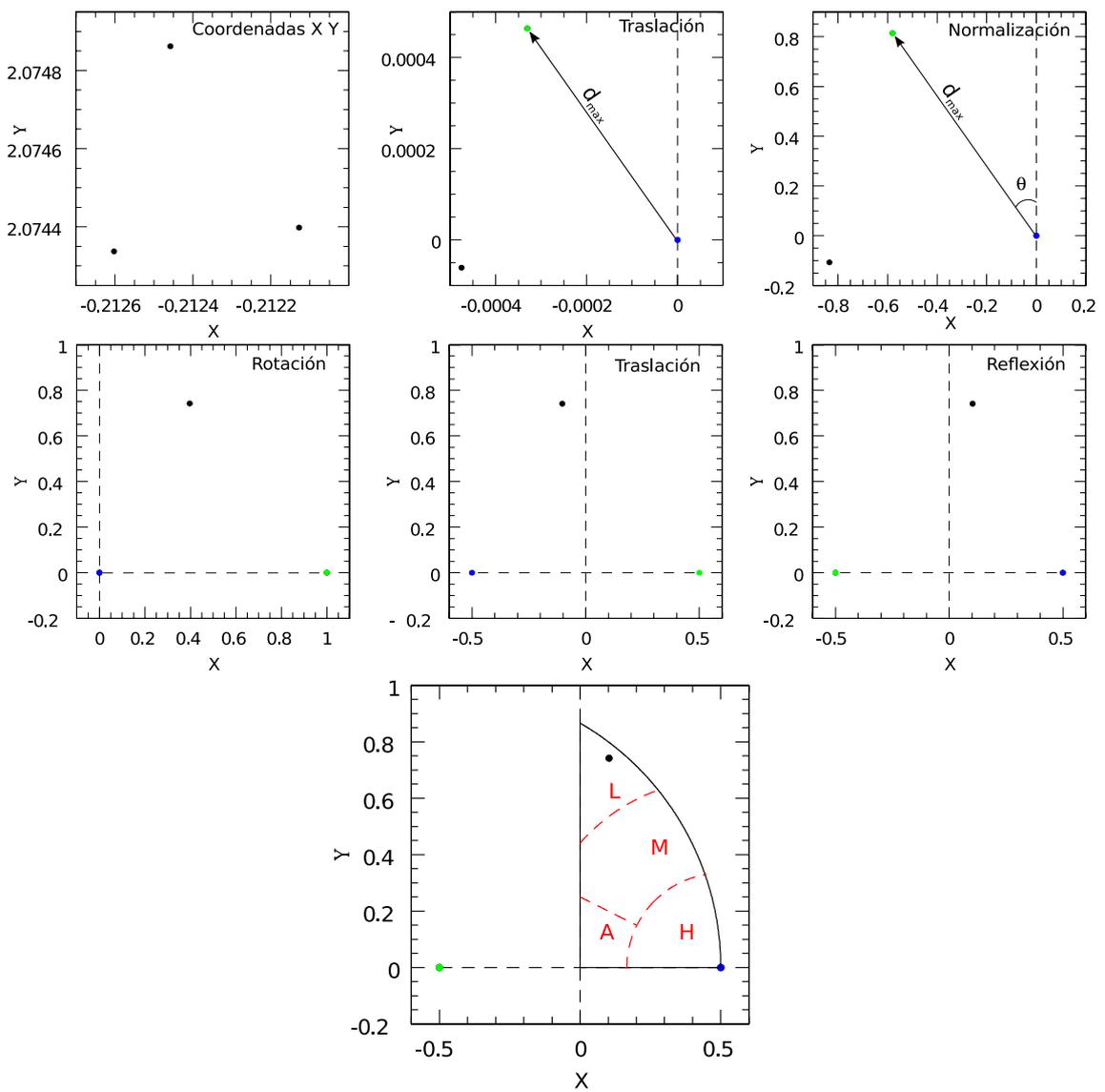


**Figura 5.2:** Imagen ilustrativa de una proyección estereográfica oblicua de un triángulo.

Una vez que se obtienen las coordenadas  $(x, y)$  de las galaxias miembro del triplete, a partir de las coordenadas de ascensión recta y declinación  $(\alpha, \delta)$  de las mismas, es necesario realizar una serie de transformaciones de manera de llevar las coordenadas de las galaxias a un sistema adecuado para la confección del mapa-AA. Para este fin, en este trabajo se realizaron las siguientes transformaciones de las coordenadas  $(x, y)$  de las galaxias miembro de tripletes:

1. Se identificaron las galaxias que son extremo del vector correspondiente a la distancia máxima ( $d_{max}$ ) entre miembros del triplete y se realizó una **traslación** del sistema de coordenadas a la posición de una de estas galaxias.
2. Se **normalizaron** las distancias entre galaxias a  $d_{max}$  y se calculó el ángulo que existe entre el eje X y el vector  $d_{max}$  ( $\theta$ ).
3. Luego se realizó una **rotación** en un ángulo  $\theta$  de manera de posicionar sobre el eje X las galaxias que son extremo del vector  $d_{max}$ . De este modo las nuevas coordenadas de estos puntos son  $(0,0)$  y  $(1,0)$ .
4. Para poder representar las configuración del triplete en el mapa-AA, las posiciones de estas galaxias deben ser  $(-0.5,0)$  y  $(0.5,0)$  por este motivo se realizó una **traslación** de coordenadas considerando  $x' = x - 0.5$ .
5. Si la posición de la tercer galaxia no cae en el cuadrante xy positivo, entonces es necesario realizar una serie de transformaciones de **reflexión** para llevar la tercer galaxia a este cuadrante, ya que en esta región es donde se encuentra el mapa-AA.

Un ejemplo de estas transformaciones puede observarse en la figura 5.3. Es importante destacar que ninguna de estas transformaciones modifica la forma real del triángulo formado por las tres galaxias del triplete.



**Figura 5.3:** Ejemplos de las transformaciones realizadas sobre las coordenadas de las galaxias miembro de tripletes para poder representar sus configuraciones en el mapa-AA.

## 5.2. Análisis de Configuraciones

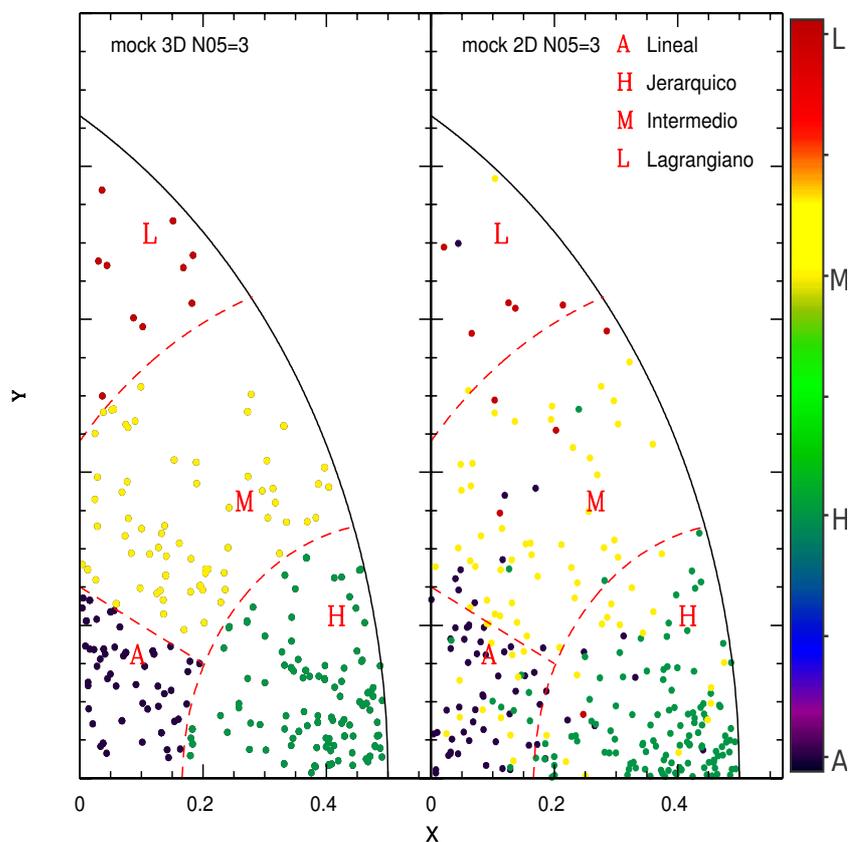
### 5.2.1. Configuraciones reales versus configuraciones proyectadas

Una pregunta que surge del esquema de análisis de configuraciones de sistemas triples empleando el mapa-AA es que este es un estudio de la configuración del sistema proyectada en el cielo y no un estudio de la configuración real en tres dimensiones del triplete. Los posibles efectos de proyección en las configuraciones de sistemas triples fueron analizados por Chernin et al. (1994). Estos autores encontraron que una distribución uniforme de sistemas en el mapa-AA real (es decir aquel formado por las configuraciones en 3D de los tripletes) se convierte en una distribución altamente no uniforme al analizar las configuraciones proyectadas. Así mismo el efecto de proyecciones incrementa el número de tripletes observados en la área de sistemas jerárquicos (H).

De manera de corroborar que las configuraciones de los tripletes según su ubicación en el mapa-AA no están sesgadas por efectos de proyección, se analizaron las configuraciones de sistemas triples aislados obtenidos a partir del catálogo sintético descrito en el capítulo 4. Se obtuvieron las configuraciones reales en tres dimensiones de los tripletes (3D) así como las configuraciones proyectadas en el mapa-AA (2D).

La figura 5.4 muestra el mapa-AA para las configuraciones 3D de los tripletes del catálogo sintético que se encuentran aislados considerando que no existe otro vecino significativo dentro de  $0.5 h^{-1}\text{Mpc}$  ( $N_{05} = 3$ ). En esta figura también se observan las configuraciones proyectadas de estos sistemas. Utilizando grilla de colores, se han distinguido en el mapa 2D las configuraciones reales de los sistemas, de manera de estimar el porcentaje de tripletes que poseen configuraciones con la misma categoría que sus configuraciones reales.

Luego se estimó el porcentaje de sistemas 2D en cada área cuya configuración proyectada coincide con la configuración real como  $N_{2D3D}/N_{2D}$  (tripletes 2D3D). La tabla 5.1 resume la cantidad de sistemas en cada área para las configuraciones reales y para las proyectadas y los porcentaje de tripletes 2D3D en cada zona del mapa-AA.



**Figura 5.4:** Mapa-AA para los tripletes aislados obtenidos a partir del catálogo sintético descrito en el capítulo 4. *Izquierda:* Configuraciones 3D reales. *Derecha:* Configuraciones 2D proyectadas.

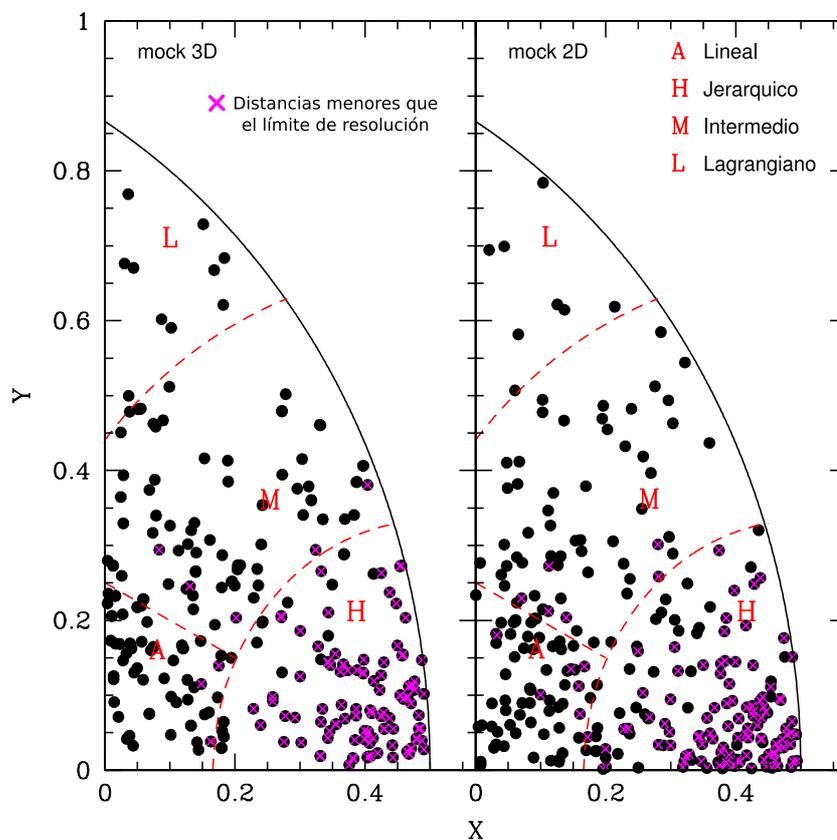
**Tabla 5.1:** Cantidad de tripletes 3D y 2D en cada zona del mapa-AA y porcentajes de tripletes 2D3D para cada configuración.

Configuración	Tripletes 3D	Tripletes 2D	Tripletes 2D3D
A	62	65	68 %
H	126	142	81 %
M	76	59	75 %
L	10	8	63 %

Desde este análisis se puede concluir que son los sistemas M los que presentan mayor dispersión entre las diferentes zonas del mapa-AA proyectado. Las configuraciones H son las menos contaminadas pero los sistemas en proyección se ubican más cerca de la esquina inferior derecha del mapa, es decir que el par de galaxias cercano que forma la configuración jerárquica se encuentra a distancias proyectadas menores que la distancia real en 3D. Así mismo las proyecciones producen un exceso de sistemas en el área H en comparación con las configuraciones reales. Estos resultados están de acuerdo con los encontrados por Chernin et al. (1994). Sin embargo, en todos los casos más del 60 % de los sistemas en proyección poseen configuraciones que se corresponden con las obtenidas en tres dimensiones, por lo que se puede concluir que el mapa-AA es una herramienta adecuada para analizar las configuraciones de sistemas triples ya que representa de manera consistente las configuraciones reales de los mismos.

Al analizar el mapa-AA de configuraciones reales de los tripletes (panel izquierdo de la figura 5.4) puede observarse que los tripletes del catálogo sintético presentan un exceso de sistemas en la esquina inferior derecha del área H. Este exceso no es debido a efectos de proyección sino a sistemas que poseen dos galaxias muy cercanas entre sí y que, en la mayoría de los casos, se encuentran a distancias menores de  $5 h^{-1}$  kpc, límite de resolución de la simulación Millennium en la cual se basa el catálogo sintético. La figura 5.5 muestra el mapa-AA real 3D y proyectado 2D para los tripletes obtenidos desde el catálogo sintético dónde se han distinguido aquellos sistemas cuyas distancias mínimas se encuentran fuera del límite de resolución de la simulación. Más del 90 % de estos sistemas pertenecen al área H y se encuentran preferentemente ubicados en la zona que comprende sistemas con distancias mínimas entre galaxias varia veces menores que la distancia  $d_{max}$  entre galaxias del triplete.

Con el fin de cuantificar de manera correcta la cantidad de objetos en cada zona del mapa-AA 3D y 2D del catálogo sintético, se excluyeron aquellos sistemas fuera del límite de resolución. Luego se calculó la densidad de sistemas en cada área como  $\alpha_i = \rho_i / \rho$  donde  $\rho_i$  es la densidad de tripletes en el área  $i$  (con  $i=A, H, M, L$ ) calculada como el número de objetos por unidad de área de cada zona, y  $\rho$  es la densidad de todo el mapa-AA, calculada como el número total de tripletes dividido en el área total del mapa. Los resultados se muestran en la tabla 5.2.



**Figura 5.5:** Mapa-AA de los tripletes aislados 3D (izquierda) y 2D (derecha) obtenidos a partir del catálogo sintético. Las cruces muestran los sistemas que poseen distancias mínimas entre galaxias menores al límite de resolución de la simulación.

**Tabla 5.2:** Valores de la densidad de tripletes en cada área del mapa-AA del catálogo sintético.

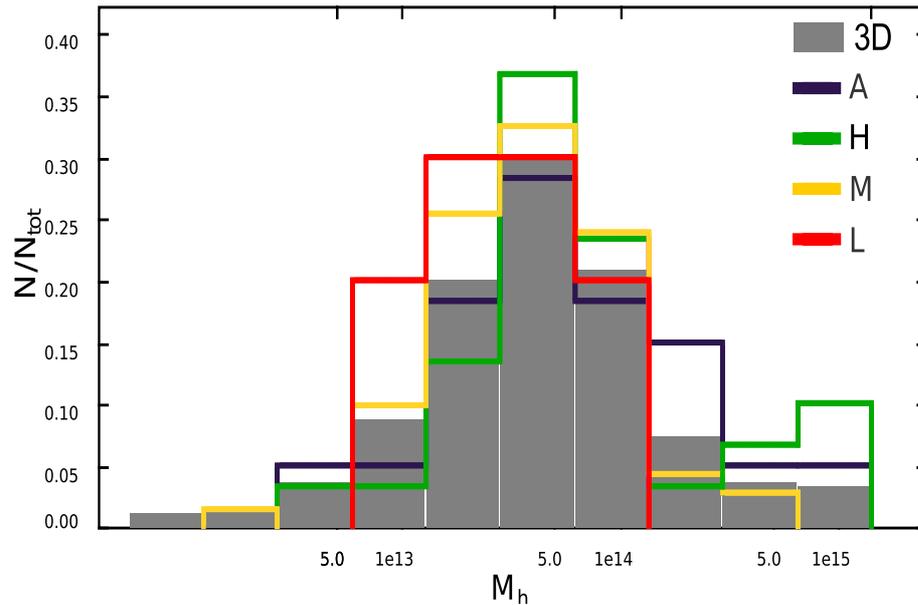
Muestra	$\alpha_A$	$\alpha_H$	$\alpha_M$	$\alpha_L$
Tripletes 3D	$3.08 \pm 0.64$	$0.46 \pm 0.14$	$1.03 \pm 0.20$	$0.34 \pm 0.13$
Tripletes 2D	$3.08 \pm 0.64$	$0.94 \pm 0.22$	$0.77 \pm 0.17$	$0.27 \pm 0.12$

Estos resultados implican que, tanto en el mapa 3D como el 2D, la mayoría de los sistemas se encuentran concentrados en el área A del mapa, es decir presentan configuraciones lineales. Desde el análisis de la densidad de sistemas en el área jerárquica queda también en evidencia que las proyecciones producen un leve aumento de sistemas en el área H del mapa-AA.

### 5.2.2. *Masa del halo de materia oscura y su relación con la configuración del triplete*

Las simulaciones numéricas de la evolución dinámica de un sistema de tres cuerpos de masa comparable muestran que, si no se considera el contenido de materia oscura, estos sistemas poseen configuraciones jerárquicas compuestas por una binaria cercana durante la mayor parte de su tiempo de vida (por ejemplo, Chernin et al., 1994; Kiseleva, 2000). Esta situación cambia completamente si se incluye en el sistema un halo de materia oscura distribuido en el volumen del sistema, inclusive si se consideran halos pequeños de unas pocas masas la masa total del triplete. Kiseleva (2000) realizó simulaciones numéricas de sistemas de tres cuerpos de masa similar, considerando la evolución del sistema sin incluir materia oscura e incluyendo un halo distribuido en el volumen del triplete con un contenido de materia oscura 3 veces más masivo que la masa total del sistema. Estos autores realizaron un análisis de las trayectorias de las partículas del triplete comenzando con configuraciones iniciales elegidas al azar dentro del mapa-AA y encontraron que en los sistemas sin materia oscura las binarias temporarias comienzan a formarse en un tiempo aproximadamente igual a dos tiempos de cruce. Cuando el sistema alcanza los tres tiempos de cruce la tercer partícula se encuentra en un estado de eyección inminente. Este escenario se modifica considerablemente cuando se incluye un halo de materia oscura que hace que la dinámica de todo el triplete sea más estocástica, sin observarse formación de binarias cercanas dentro de los tres tiempos de cruce del sistema.

Resulta interesante analizar la masa del halo de materia oscura en el que los tripletes obtenidos desde el catálogo sintético se encuentran inmersos. Estos sistemas cumplen con la condición de que todas sus galaxias pertenecen al mismo halo de materia oscura, sin embargo la masa del halo podría variar según las diferentes



**Figura 5.6:** Distribución de masa del halo de materia oscura en el que se encuentran inmersos los tripletes 3D obtenidos desde el catálogo sintético. Se ha diferenciado entre las diferentes configuraciones de los tripletes según la posición en el mapa-AA.

configuraciones del triplete.

La figura 5.6 muestra la distribución de la masa del halo de materia oscura ( $M_h$ ) en la que se encuentran inmersos los tripletes obtenidos desde el catálogo sintético, eliminando aquellos sistemas con galaxias más cercanas que el límite de resolución de la simulación. Se muestran las distribuciones distinguiendo entre las diferentes configuración del mapa-AA construido a partir de las configuraciones 3D de los mismos. Desde esta figura se observa que no existe una diferencia significativa en el valor promedio de las masas de los halos según la configuración del sistema. Sin embargo, para halos masivos ( $M_h > 1.5 \cdot 10^{14} M_\odot$ ) las configuraciones A y H presentan una fracción del 16 y 13%, respectivamente, en comparación con los sistemas M y L cuyas fracciones son del 4 y 0% para halos de estas masas. Por otro lado existe una leve tendencia de los sistemas L a residir en halos de menor masa. Para este último caso el número de sistemas es bajo por lo que la distribución puede no ser representativa del comportamiento de la población de tripletes con configuraciones L.

### 5.2.3. Configuraciones de tripletes

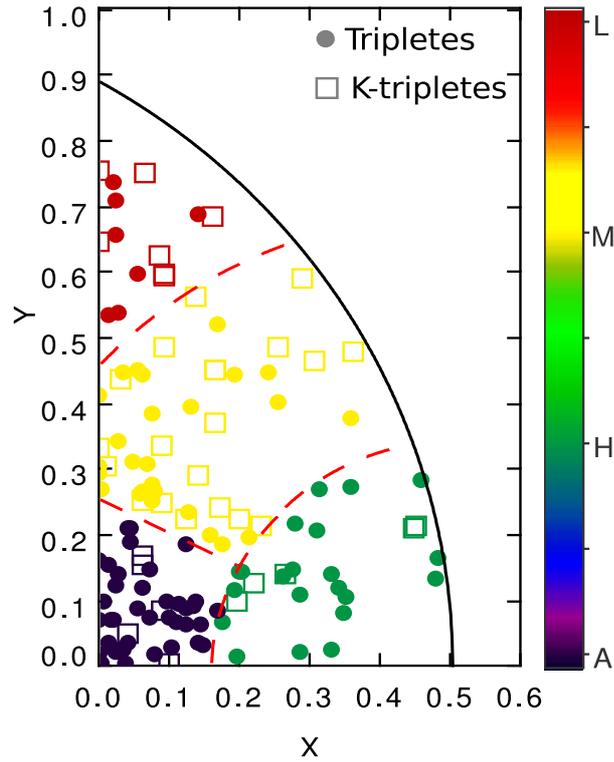
Luego de realizar un análisis de configuraciones utilizando sistemas triples obtenidos desde catálogos sintéticos y corroborar la eficiencia del mapa-AA para describir las diferentes configuraciones reales de tripletes, resulta interesante analizar las configuraciones de los sistemas triples obtenidos desde los datos del SDSS.

Debido al alto grado de contaminación que presentan los tripletes obtenidos utilizando información de redshift fotométricos, se optó por realizar un análisis de configuraciones empleando el catálogo de sistemas triples con sus tres galaxias miembro con espectroscopía. La figura 5.7 muestra el mapa-AA para los 92 tripletes en este catálogo.

A modo comparativo resulta también interesante realizar un análisis de las configuraciones de los tripletes espectroscópicos en relación a las configuraciones de sistemas pertenecientes a otras muestras. Para tal fin se utilizó el catálogo “Isolated Triplets of Galaxies” de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988). A partir de esta muestra se seleccionaron aquellos sistemas que son totalmente aislados, es decir que poseen un indicador de aislamiento en el catálogo igual a (+++). Además se impuso una condición sobre el valor rms de la diferencia de velocidad radial de las galaxias miembro del sistema, seleccionando sistemas que verifiquen  $dV_{rms} < 1000 \text{ km s}^{-1}$ . Este valor fue adoptado anteriormente por Hernández-Toledo et al. (2011) para definir sistemas triples físicos en esta muestra. De esta manera se seleccionó una sub-muestra de 37 tripletes (K-tripletes) desde el catálogo original que contiene 84 sistemas. Los cuadrados abiertos en la figura 5.7 muestran la configuración en el mapa-AA de estos tripletes.

Un punto a destacar es que no se observa un exceso de sistemas jerárquicos, compuestos por dos galaxias muy próximas y una lejana (zona inferior derecha del mapa-AA), tanto en la muestra de tripletes espectroscópicos como en la muestra de K-tripletes.

La densidad de sistemas en cada área del mapa-AA, para los tripletes espectroscópicos y para los K-tripletes, se muestra en la tabla 5.3. A modo comparativo en esta tabla también se muestran los valores de  $\alpha$  para el mapa-AA 2D del catálogo sintético.

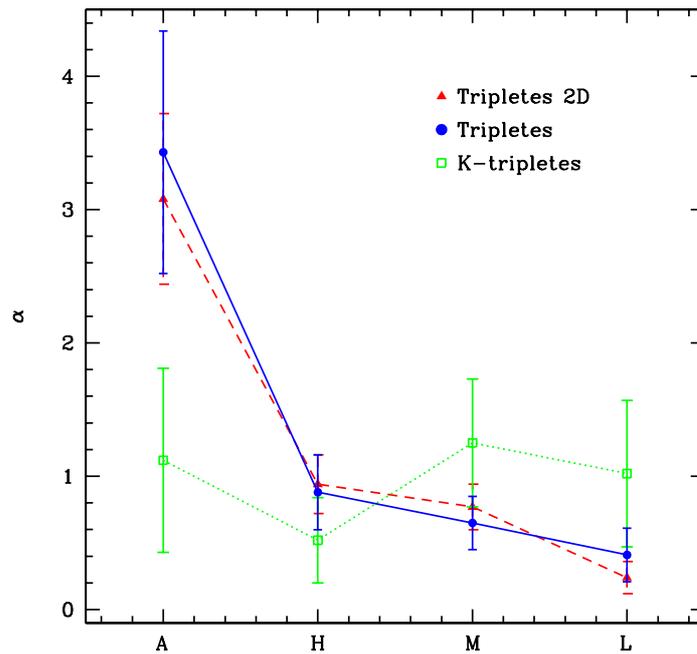


**Figura 5.7:** Mapa-AA para la muestra de tripletes espectroscópicos y para la muestra de tripletes físicos aislados del catálogo de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988) (K-tripletes).

**Tabla 5.3:** Valores de la densidad de tripletes en cada área del mapa-AA.

Muestra	$\alpha_A$	$\alpha_H$	$\alpha_M$	$\alpha_L$
Tripletes 2D	$3.08 \pm 0.64$	$0.94 \pm 0.22$	$0.77 \pm 0.17$	$0.27 \pm 0.12$
Tripletes	$3.43 \pm 0.91$	$0.88 \pm 0.28$	$0.65 \pm 0.20$	$0.41 \pm 0.20$
K-tripletes	$1.12 \pm 0.69$	$0.52 \pm 0.32$	$1.25 \pm 0.48$	$1.02 \pm 0.55$

La figura 5.8 muestra el valor de  $\alpha$  en función de las diferentes configuraciones para la muestra de tripletes espectroscópicos, para los tripletes 2D del catálogo sintético y para los K-tripletes. A partir del análisis de los valores de densidad en cada zona del mapa-AA se concluye que los tripletes espectroscópicos presentan configuraciones similares a los tripletes del catálogo sintético, siendo la mayoría de estos sistemas, tripletes tipo A, es decir con configuraciones lineales. Para el caso de los K-tripletes no se observa una preferencia fuerte de estos sistemas a poseer una configuración particular en el mapa-AA.



**Figura 5.8:** Valor de la densidad  $\alpha$  en función de configuraciones del mapa-AA, para la muestra de tripletes 2D del catálogo sintético (tripletes 2D), para la muestra de tripletes espectroscópicos (tripletes) y para la muestra de tripletes físicos aislados del catálogo de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988) (K-tripletes). Las barras de error se corresponden con el error estándar de estas estimas.

### 5.3. Propiedades Dinámicas

De manera de caracterizar las propiedades dinámicas de los sistemas triples se estimaron el radio mínimo que contiene a las galaxias del triplete ( $R$ ), la dispersión de velocidades ( $\sigma_V$ ), el tiempo de cruce ( $t_c$ ) y la compacticidad del sistema ( $S$ ).

El radio mínimo  $R$  que encierra el sistema fue calculado como el círculo mínimo que contiene los centros de las galaxias del triplete utilizando el código desarrollado por Hearn & Vijay (1982).

Una vez obtenido este valor, se define la compacticidad  $S$ , como:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N r_{90}^2}{R^2}$$

donde  $r_{90}$  es el radio que encierra 90% del flujo Petrosian de la galaxia en la banda  $r$ ,  $R$  es el radio del círculo mínimo que contiene los centros geométricos de las galaxias en el sistema y  $N$  es el número total de miembros del sistema. Por definición, esta cantidad es una medida del porcentaje de la superficie total del sistema que

está llena por la luz de las galaxias miembro.

La dispersión de velocidades y el tiempo de cruce se calcularon siguiendo el trabajo de Hickson et al. (1992) como:

$$\sigma_V^2 = \langle V^2 \rangle - \langle V \rangle^2$$

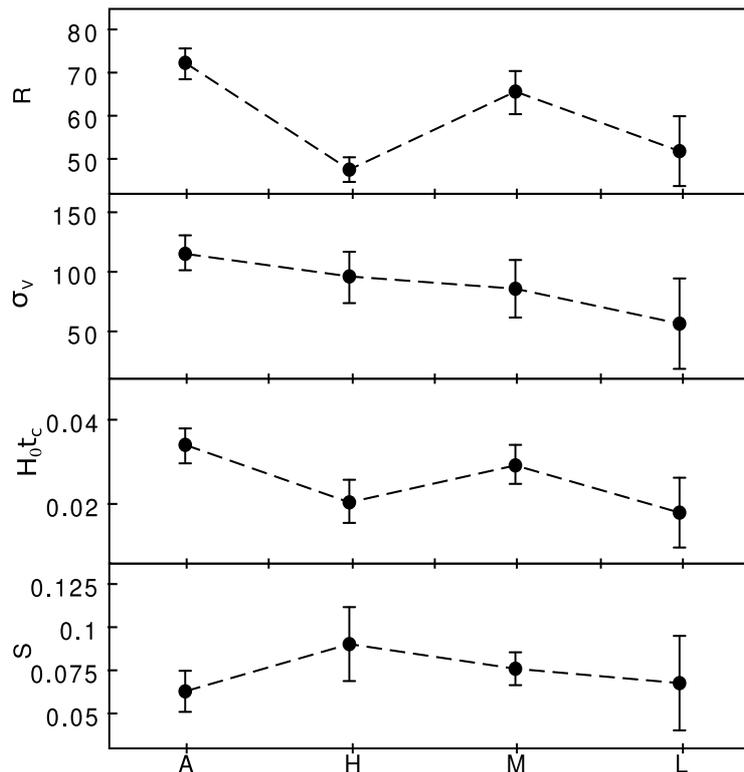
$$t_c = \frac{4}{\pi} \frac{R}{3\sigma_V}$$

El tiempo de cruce adimensional  $H_0 t_c$  es una medida conveniente del estado dinámico del sistema ya que es una estima de la cantidad máxima de veces que una galaxia ha atravesado el grupo desde su formación. Por lo tanto es de esperar que los efectos de la evolución dinámica sean más pronunciados en sistemas con valores bajos de  $H_0 t_c$ .

De manera de comparar estos parámetros con los obtenidos para otras muestras de sistemas, se utilizó la muestra de tripletes de Karachentseva descrita en la sección anterior. A modo comparativo también se estimaron los parámetros dinámicos de una muestra de grupos compactos obtenida desde el catálogo de McConnachie et al. (2009) que consiste en una selección de sistemas del catálogo A de estos autores considerado aquellos grupos que posean todas sus galaxias miembro con espectroscopía. Una descripción más completa de este catálogo se da en el capítulo 6. La tabla 5.4 resume los resultados obtenidos. El parámetro S no pudo ser estimado para los tripletes de la muestra de Karachentseva ya que no se posee información del valor  $r_{90}$  para las galaxias de estos sistemas. Del análisis comparativo de los parámetros dinámicos puede concluirse que los tripletes analizados en esta tesis poseen valores intermedios entre los tripletes de la muestra de Karachentseva y los obtenidos para grupos compactos.

**Tabla 5.4:** Valores medios de los parámetros dinámicos estimados en este capítulo.

Muestra	$\langle R \rangle$	$\langle \sigma_V \rangle$	$\langle H_0 t_c \rangle$	$\langle S \rangle$
Tripletes	68.16±2.1	118.80±7.3	0.039±0.005	0.109±0.009
K-tripletes	51.75±4.23	112.15±7.6	0.033±0.005	–
Grupos Compactos	87.07±3.06	205.75±12.6	0.020±0.001	0.093±0.009



**Figura 5.9:** Valores medios de los parámetros dinámicos de los tripletes espectroscópicos en función de las diferentes configuraciones del mapa-AA.

Las diferentes configuraciones de los tripletes pueden reflejar diferentes etapas dinámicas del sistema. La figura 5.9 muestra la mediana de estos parámetros para la muestra de tripletes espectroscópicos aislados, distinguiendo entre las diferentes configuraciones del mapa-AA. Los errores han sido estimados utilizando técnicas bootstrap de re-muestreo.

Desde esta figura se observa que existe una leve tendencia descendente de los parámetros dinámicos desde las configuraciones A a las L. Los sistemas en configuraciones lineales presentan valores mayores de R y de dispersión de velocidades que se traducen en un tiempo de cruce mayor, sin embargo, del análisis del parámetro S, se observa que la luz no se encuentra muy concentrada en estos sistemas. Los sistemas L son configuraciones más abiertas con valores menores de  $\sigma_V$  y configuraciones menos compactas. Sin embargo las barras de error para los valores medios de estos sistemas son grandes. Los sistemas H presentan radios mínimos bajos, este resultado es esperable debido a que son tripletes formados por dos galaxias cercanas y una tercer galaxia más alejada. Sin embargo estos sistemas presentan valores mayores de S, es decir que son los más compactos de toda la muestra.

---

# Capítulo 6

## Propiedades de Galaxias en sistemas triples

---

### 6.1. Generalidades

Diversas propiedades de las galaxias dependen del ambiente que habitan. El trabajo de Dressler (1980) fue pionero en el análisis de la morfología de las galaxias en relación al ambiente de densidad local, postulando que las galaxias de tipo morfológico tardío habitan ambientes de baja densidad, mientras que los ambientes sobredensos tienden a estar poblados por galaxias de tipo morfológico temprano. Así mismo, existe una fuerte correlación entre la tasa de formación estelar de las galaxias y el ambiente. Las galaxias en ambientes de alta densidad local presentan un decremento en la tasa de formación estelar en comparación con galaxias de campo (Gómez et al., 2003; Balogh et al., 2004; Baldry et al., 2004; Mateus & Sodr e, 2004).

El efecto del ambiente de densidad local sobre los colores de las galaxias fue estudiado por O’Mill, Padilla & Lambas (2008). Estos autores encontraron que, a  $z = 0$ , las galaxias d ebiles presentan un claro incremento en la fracci on de galaxias rojas a medida que la densidad local aumenta, mientras que las galaxias brillantes presentan una fracci on constante de galaxias rojas.

Existen diversos procesos que influyen sobre las propiedades de las galaxias. En

los cúmulos de galaxias el medio intra-cúmulo caliente es el principal responsable en remover el gas de las galaxias en los centros de cúmulos masivos. Mecanismos como la “ram-pressure” (Gunn & Gott, 1972) y escenarios como en los que ocurren procesos como “strangulation” o “starvation” (Larson, Tinsley & Caldwell, 1980), generan un decremento en la tasa de formación estelar en los cúmulos de galaxias. Interacciones tidales y fusiones entre galaxias en pares también afectan la morfología pudiendo convertir galaxias espirales en galaxias elípticas o S0 (Toomre & Toomre, 1972). Estos procesos también pueden desencadenar brotes de formación estelar, dependiendo del reservorio de gas de las galaxias (Yee & Ellingson, 1995; Kennicutt, 1998).

Los entornos extremadamente densos de grupos compactos, donde las galaxias están separadas sólo por unos pocos radios galácticos y poseen bajas velocidades relativas, generan un escenario ideal para las interacciones y fusiones (Mamon, 1992). Diversos trabajos analizan las propiedades de galaxias en diferentes sistemas, tales como pares, grupos compactos, grupos con cuatro o más miembros y cúmulos de galaxias. Sin embargo existen poco trabajos que abordan las propiedades de galaxias en sistemas triples. Karachentseva & Karachentsev (2000) analizan tripletes en el catálogo “Catalogue of Isolated Triplets of Galaxies in the Northern Hemisphere” y encuentran que aproximadamente el 24 % de las galaxias miembro son lenticulares, mientras que el 76 % son galaxias espirales o irregulares. Hernández-Toledo et al. (2011) realizaron fotometría superficial *BVRI* para una muestra de 54 galaxias seleccionadas desde este catálogo y analizaron las propiedades de una muestra de 34 galaxias en 13 tripletes. Estos autores encontraron que estos sistemas están dominados por galaxias espirales y que una fracción del 56 % de los tripletes presentan morfologías asociadas a interacciones. También encontraron una fracción del 35 % de barras, que puede llegar hasta un 66 % en tipos morfológicos correspondientes a espirales tardías, y una fracción de 20 % de anillos que preferentemente se alojan en las componentes morfológicas tardías.

De acuerdo a estos resultados, los autores sugieren que los sistemas triples son esencialmente diferentes a los grupos compactos de Hickson y poseen características más representativas de galaxias de campo. Sin embargo los resultados del citado trabajo están basados principalmente en observaciones de un número bajo de gala-

xias. Por este motivo, los autores destacan la importancia de construir una muestra local completa de tripletes de galaxias aislados, que permita un análisis estadístico significativo.

La finalidad de este capítulo es analizar las propiedades de las galaxias en sistemas triples a través del estudio de propiedades fotométricas de los mismos así como propiedades derivadas desde el espectro. Por este motivo, en este capítulo se analizará la muestra de 92 tripletes espectroscópicos (276 galaxias miembro) descrita en el Capítulo 3, que cumple con poseer todas las galaxias miembro de los sistemas triples con información espectroscópica en el rango de redshift  $0.01 < z_{\text{spec}} < 0.14$ .

De manera de analizar las diferentes propiedades físicas de las galaxias en tripletes, se correlacionó la muestra con el catálogo de análisis de emisión de líneas del grupo MPA-JHU (Max Planck Institute for Astrophysics-Johns Hopkins University)<sup>1</sup>. Desde este catálogo se utilizó la tasa de formación estelar normalizada a la masa total en estrellas ( $\log SFR/M_*$ ) calculada según Brinchmann et al. (2004). Así mismo se empleó el índice espectral  $D_n(4000)$  como un indicador de la edad de las poblaciones estelares. Esta discontinuidad espectral en los 4000Å (Kauffmann et al., 2002) es causada por la acumulación de un gran número de líneas en una región angosta del espectro y es una característica espectral fuerte en poblaciones estelares envejecidas. En este trabajo se ha adoptado la definición de Balogh et al. (1999) para el índice  $D_n(4000)$  como el cociente de la densidad de flujo promedio entre las bandas angostas del continuo 3850-3950 Å y 4000-4100 Å. Así mismo se utilizó la masa estelar total del sistema en unidades de masas solares ( $\log M_*/M_\odot$ ) obtenida a partir de ajustes a la fotometría según Salim et al. (2007). También se ha utilizado el índice de color ( $M_g - M_r$ ) derivado desde la fotometría. El color de una galaxia está correlacionado con la formación estelar y edad de las poblaciones estelares ya que las galaxias formadoras de estrellas presentan colores azules mientras que los colores más rojos son característicos de las poblaciones estelares envejecidas

---

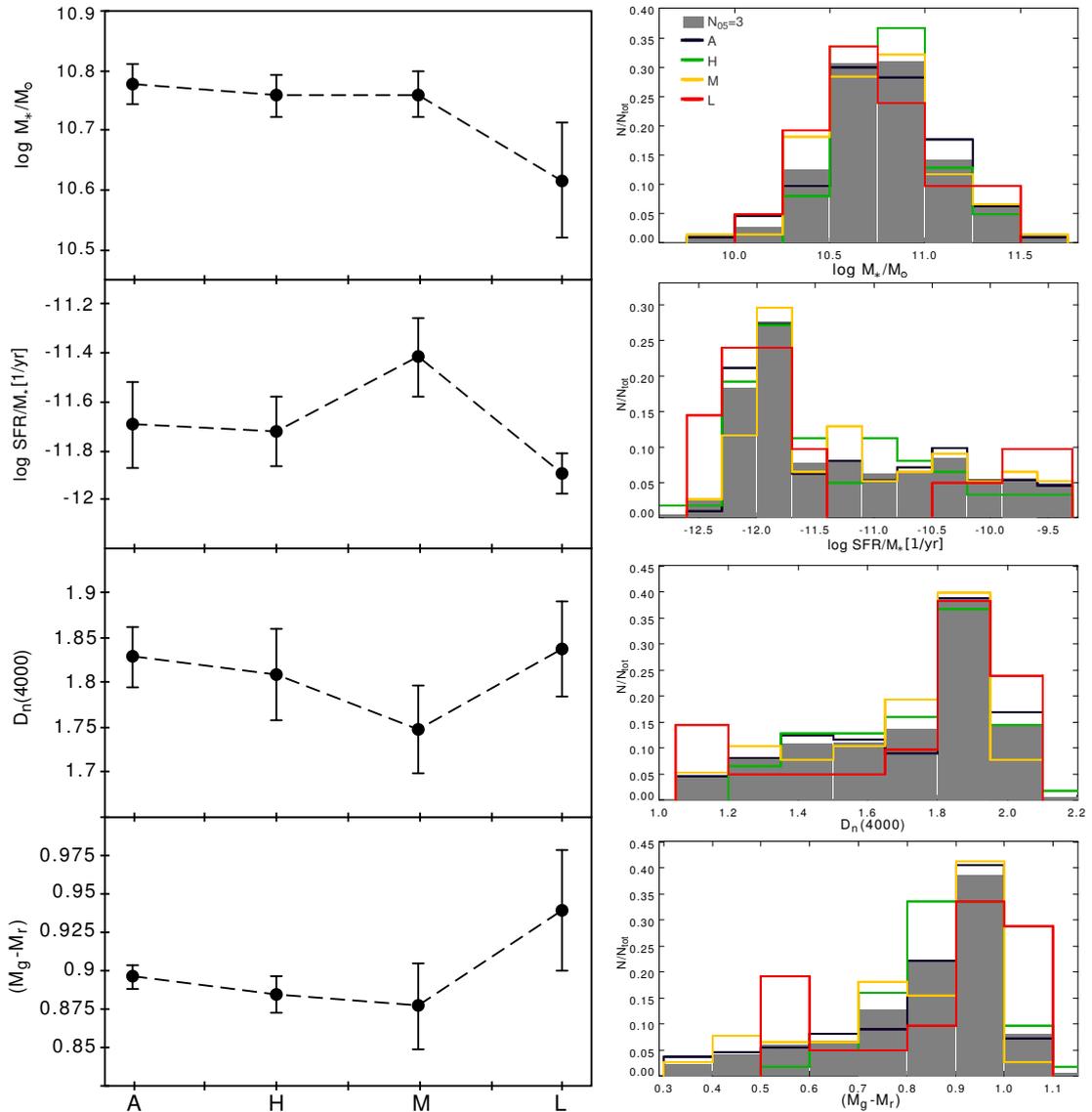
<sup>1</sup><http://www.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/>

## 6.2. Propiedades de galaxias en tripletes según la configuración del sistema

La configuración del triplete puede influir en las propiedades de las galaxias que lo conforman ya que mecanismos como las interacciones actúan de manera diferente en un sistema jerárquico formado por un par cercano más una galaxia lejana que en un triplete lagrangiano donde las distancias entre galaxias miembro son del mismo orden. Por este motivo en esta sección se compararán las propiedades de las galaxias en la muestra de tripletes espectroscópicos según la configuración del sistema en el mapa-AA descrita en el capítulo 5.

Luego se analizaron los valores de  $\log M_*/M_\odot$ ,  $\log SFR/M_*$ , índice  $D_n(4000)$  y color ( $M_g - M_r$ ) de las galaxias en la muestra de tripletes espectroscópicos, según las configuraciones de los mismos sean A (lineales), H (jerárquicas), M (intermedias) o L (lagrangianas). En el panel derecho de la figura 6.1 se muestran las distribuciones de las propiedades para las galaxias de la muestra de tripletes espectroscópicos aislados ( $N_{05} = 3$ ) y para las submuestras de estos sistemas según su posición en el mapa-AA. El panel izquierdo de esta figura muestra los valores de la mediana de estos parámetros en función de la configuración del sistema.

En relación a la masa en estrellas de las galaxias del sistema, tanto a partir de las distribuciones como de los valores de la mediana, se observa que no existe gran diferencia entre los miembros de tripletes con configuraciones A, H y M, mientras que las galaxias en tripletes L presentan una leve tendencia a poseer valores menores de  $\log M_*/M_\odot$ . Así mismo los valores de la mediana de  $\log SFR/M_*$ , del índice  $D_n(4000)$  y del color ( $M_g - M_r$ ) de las galaxias en tripletes A, H y M no difieren significativamente. Los valores de la mediana de estos parámetros para los sistemas L presentan una tendencia leve a reflejar poblaciones estelares con formación estelar menor, colores más rojos y poblaciones estelares más envejecidas que el resto de las configuraciones. Por otro lado los histogramas correspondientes a estas propiedades para las galaxias en tripletes con configuraciones lagrangianas presentan un comportamiento bimodal que no se observa en el resto de los sistemas, sobre todo en el caso de la tasa de formación estelar específica. Sin embargo al ser solamente 10 sistemas los que presentan configuración L los errores en las estimas son grandes, por



**Figura 6.1:** *Izquierda:* valores de la mediana de  $\log M_*/M_\odot$ ,  $\log SFR/M_*$ , índice  $D_n(4000)$  y color  $(M_g - M_r)$  de las galaxias en la muestra de tripletes espectroscópicos aislados ( $N_{05} = 3$ ) en función de la configuración del sistema. Las barras de error fueron calculadas utilizando técnicas bootstrap.

*Derecha:* Distribución de estos parámetros para las galaxias de los sistemas analizados distinguiendo entre las diferentes configuraciones del mapa-AA (ver referencias en la figura).

lo que debe considerarse que las tendencias obtenidas no poseen un grado elevado de significancia estadística.

### 6.3. Comparación de propiedades de galaxias en tripletes con propiedades de galaxias en otros sistemas.

En esta sección se compararán las propiedades de las galaxias en tripletes con las propiedades de galaxias en otros sistemas. Para tal fin se utilizaron muestras de galaxias en pares, grupos compactos y cúmulos. Todas estas muestras se correlacionaron con el catálogo del MPA-JHU de manera de obtener para las galaxias los valores de  $\log M_*/M_\odot$ ,  $\log SFR/M_*$  e índice  $D_n(4000)$ .

Las muestras de comparación empleadas son las siguientes:

- **Grupos Compactos (*cgs*):** McConnachie et al. (2009) identificaron grupos compactos de galaxias en el SDSS-DR6, a través de la implementación del criterio de Hickson (ver el Capítulo 3 para una descripción de este criterio). Estos autores construyeron dos catálogos: el Catálogo A contiene galaxias con magnitud aparente de Petrosian en la banda  $r$  en el intervalo  $14.5 \leq r \leq 18.0$  y el Catálogo B contiene galaxias en el rango más amplio  $14.5 \leq r \leq 21.0$ . Los autores realizaron una inspección visual de las galaxias en el Catálogo A de manera de eliminar galaxias identificadas erróneamente.

Estos catálogos han sido extraídos desde los datos fotométricos del SDSS y por lo tanto tienen contaminación debida a diversas fuentes, por ejemplo: algunos objetos clasificados como galaxias por el algoritmo del SDSS resultan ser estrellas, así mismo objetos con errores grandes en la magnitud aparecen como galaxias brillantes, rastros de trayectoria de satélites a veces son clasificados como galaxias, algunas observaciones se encuentran muy cerca de objetos saturados por lo que su fotometría es poco fiable, galaxias extendidas cercanas se identifican como muchas fuentes más pequeñas, etc. Debido a la inspección visual independiente, realizada por los autores, de todas las galaxias miembro de los grupos del Catálogo A, la contaminación debido a los errores fotométricos es insignificante. Esta muestra incluye grupos compactos que tie-

nen  $\Delta v \leq 1000 \text{ km s}^{-1}$  donde  $\Delta v$  es una medida de la diferencia máxima de velocidad en la línea de la visual entre los miembros del grupo, para sistemas con más de dos miembros que poseen información de redshift espectroscópico. El Catálogo B incluye muchos más grupos que el Catálogo A, pero tiene la desventaja de poseer mayor contaminación debido a errores en la fotometría del SDSS.

Por los motivos expuestos anteriormente, en este trabajo se utilizará el Catálogo A como muestra de comparación. Este catálogo se construyó a partir de la sexta versión del SDSS, por este motivo se añadió a los datos información de redshift espectroscópico del SDSS-DR7 de manera de utilizar los sistemas en el Catálogo A que tengan todas sus galaxias con mediciones espectroscópicas.

Cabe destacar que se realizó una correlación entre la muestra de tripletes y el Catálogo A de grupos compactos con el fin de excluir los sistemas comunes. Se encontraron 5 coincidencias de tripletes que pertenecen a la muestra de grupos compactos. De estos sistemas comunes, tres consisten en las tres galaxias del triplete más una cuarta galaxia con  $\Delta v > 1000 \text{ km s}^{-1}$ . Esto se debe a que al incluir información de redshift del SDSS-DR7 se encuentra que una de las galaxias posee redshift discordante. Un cuarto sistema común está compuesto por las tres galaxias del triplete más una galaxia más débil que  $M_r = -20.5$ , que no ha sido tomada en cuenta al realizar el aislamiento del triplete. El quinto grupo compacto posee las tres galaxias del triplete más una galaxia con redshift discordante y una galaxia con  $M_r > -20.5$ . Por las razones mencionadas anteriormente, se eliminaron estos 5 grupos compactos de la muestra original.

- **Diez galaxias más brillantes de cúmulos (10FRCGs):** Esta muestra fue derivada del catálogo de grupos de galaxias de Zapata et al. (2009) actualizado al SDSS-DR7. Estos autores implementan un algoritmo FOF con longitudes de enlace  $D_{12} = D_0 R$  y  $V_{12} = V_0 R$ , en la dirección perpendicular y paralela a la línea de visión, respectivamente, donde  $D_0 = 0.24 h^{-1} \text{ Mpc}$  y  $V_0 = 450 \text{ km s}^{-1}$ . El factor de escala  $R$  tiene en cuenta la variación en la densidad espacial de galaxias en una muestra limitada en flujo (para más información sobre el algoritmo FOF ver el Capítulo 3). A partir de este catálogo,

se seleccionó una muestra de cúmulos de galaxias considerando sistemas con masas viriales  $M_{vir} > 10^{14} h^{-1} M_{\odot}$  y más de 10 galaxias miembro. Las galaxias en estos sistemas se ordenaron de acuerdo a su luminosidad en la banda  $r$  y se compiló una muestra seleccionando las diez primeras galaxias más brillantes de cada cúmulo, excluyendo la galaxia más luminosa de cada sistema, ya que estas galaxias suelen tener características muy distintivas.

- **Pares:** La muestra de pares de galaxias analizadas en este trabajo se obtuvo a partir del trabajo de Lambas et al. (2012). Estos autores construyeron un catálogo de pares seleccionando galaxias del SDSS-DR7 con separaciones proyectadas  $r_p < 25 h^{-1}$  kpc y diferencia de velocidad radial relativa  $\Delta V < 350 \text{ km s}^{-1}$ . Estudios previos muestran que estos límites son adecuados para definir pares de galaxias con una mayor actividad de formación estelar (Lambas et al., 2003; Alonso et al., 2006). En este trabajo se excluyeron los sistemas que se encuentran en grupos, de acuerdo con Alonso et al. (2012) que analizan en detalle las propiedades de las interacciones de galaxias en entornos de alta densidad. La identificación de pares en grupos se realizó a través de una correlación cruzada del catálogo total de pares de Lambas et al. (2012) con el catálogo de grupos construido por Zapata et al. (2009), actualizado al SDSS-DR7.

### 6.3.1. Muestras de Control

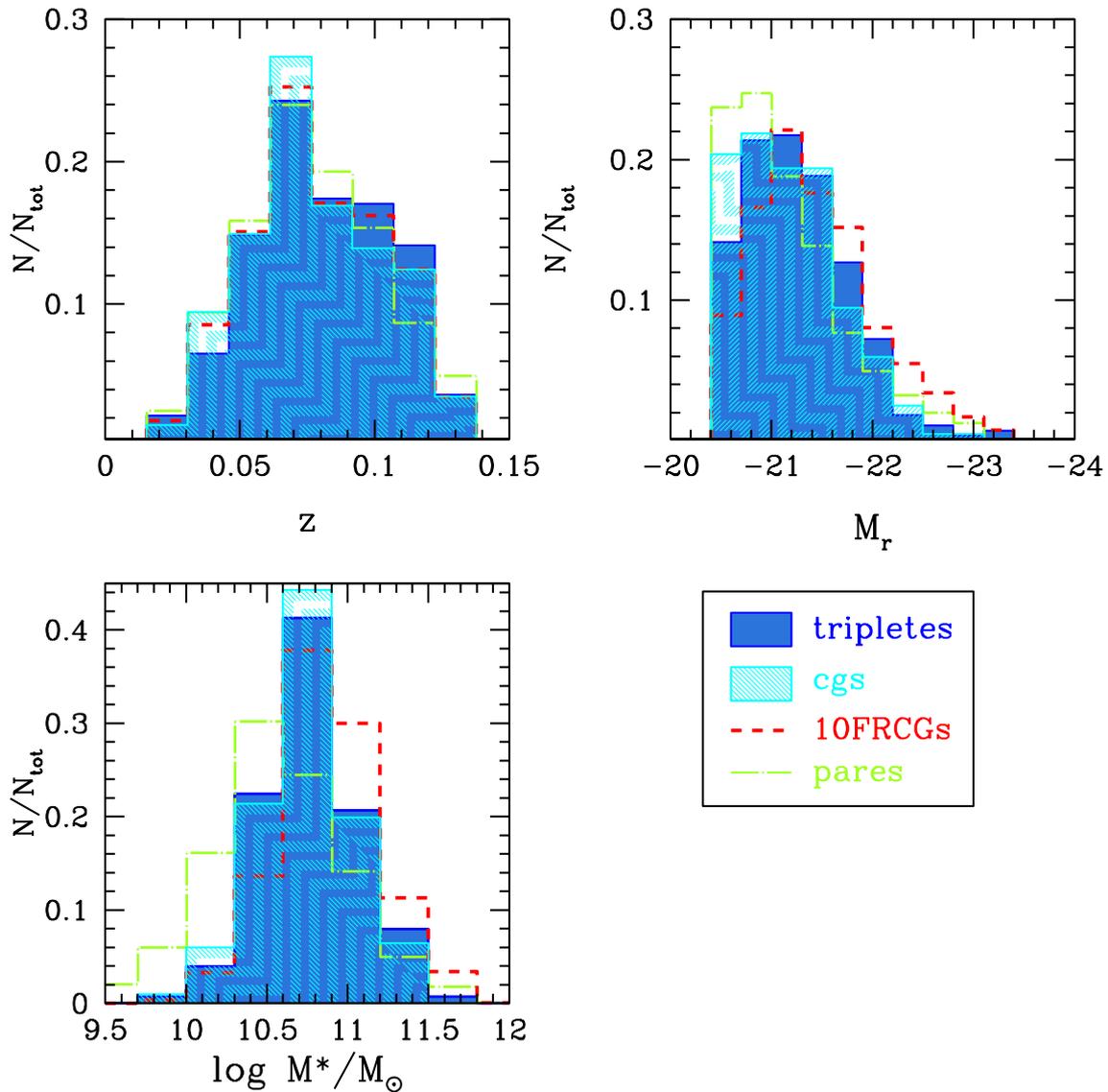
Al comparar las propiedades de las galaxias que pertenecen a diferentes muestras es importante tener en cuenta las diferencias en la distribución de redshift de las galaxias. Por esta razón, se construyeron muestras control a partir de las diferentes muestras de sistemas analizadas en esta sección, utilizando un algoritmo de Monte-Carlo que selecciona aleatoriamente galaxias que reproduzcan la distribución de redshift de las galaxias en tripletes. Estas galaxias han sido seleccionadas desde una muestra limitada en volumen ( $M_r \leq -20.5$  y  $0.01 < z < 0.14$ ), por este motivo se han restringido las muestras de galaxias en pares, grupos compactos y cúmulos a tener magnitudes absolutas más brillantes que  $M_r = -20.5$ , con el fin de evitar sesgos

**Tabla 6.1:** Nombre y número de galaxias en la muestra de tripletes y en las muestras control.

Nombre	Número de galaxias
Tripletes	276
<i>cgs</i>	230
Pares	472
10FRCGs	2089

debidos a la inclusión de galaxias menos luminosas. De manera de analizar las distribuciones de redshift de las diferentes muestras control en relación a la distribución de redshift de galaxias en tripletes, se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS). A partir de esta prueba se obtiene el valor  $p$  que representa la probabilidad de que un valor de la estadística KS sea igual o mayor que el valor observado, si se verifica la hipótesis nula. En todos los casos se obtuvo  $p > 0.05$  para la hipótesis nula de que las muestras hayan sido generadas desde la misma distribución. La tabla 6.1 resume el nombre y el número de objetos en la muestra de galaxias en triplete y en las muestras de control analizadas en este trabajo.

La figura 6.2 muestra las distribuciones de redshift ( $z$ ), magnitud absoluta en la banda  $r$  ( $M_r$ ) y masa en estrellas ( $\log M_*/M_\odot$ ) para la muestra de galaxias en tripletes y para las muestras control de galaxias en *cgs*, pares y 10FRCGs. Desde esta figura puede observarse que todas las muestras presentan una distribución de redshift similar. La restricción  $M_r > -20.5$  se ve reflejada en la distribución de  $\log M_*/M_\odot$ . Aunque todas las muestras abarcan un rango semejante de masa en estrellas, en comparación con las galaxias en tripletes, las galaxias en pares presentan un desplazamiento hacia la cola menos masiva de la distribución y las 10FRCGs muestran un incremento en el número relativo de galaxias masivas con respecto a la muestra de galaxias en tripletes. Sin embargo, la distribución de  $\log M_*/M_\odot$  de galaxias en *cgs* es muy similar a la distribución de los miembros de sistemas triples. Con el fin de evitar sesgos debidos a diferencias en el contenido en masa en estrellas de las galaxias en las distintas muestras de sistemas, el análisis se ha restringido a la zona de cobertura de la muestra de galaxias en tripletes ( $10 \leq \log M_*/M_\odot \leq 11.5$ ).



**Figura 6.2:** Distribuciones normalizadas de redshift ( $z$ , panel superior), magnitud absoluta en la banda  $r$ , ( $M_r$ , panel del medio) y masa en estrellas ( $\log M_*/M_\odot$ , panel inferior) para las muestras de galaxias analizadas en esta sección (ver referencias en la figura).

### 6.3.2. Análisis de las propiedades de galaxias en tripletes

El objetivo de esta sección es comparar las propiedades de las galaxias individuales en tripletes con galaxias en grupos compactos, pares y cúmulos. Estas galaxias habitan entornos con diversas densidades locales y globales, por lo tanto, sus principales propiedades pueden verse afectadas por diferentes procesos relacionados con el ambiente y la evolución.

Las galaxias en los cúmulos suelen presentar tipos morfológicos tempranos, tasas de formación estelar baja y colores rojos. El escenario preferido para la formación

de estas galaxias invoca un conjunto de mecanismos eficientes en remover el gas de galaxias espirales (“ram-pressure stripping”, “strangulation” o “starvation”).

Las interacciones en pares de galaxias juegan un papel importante en el establecimiento de propiedades de las mismas. Diferentes análisis observacionales y teóricos han demostrado que las interacciones entre galaxias cercanas proporcionan mecanismos poderosos para activar la actividad de formación estelar (Yee & Ellingson, 1995; Kennicutt, 1998). La eficiencia de los brotes de formación estelar depende de las características internas particulares de las galaxias y de su reservorio de gas (Toomre & Toomre, 1972; Barnes & Hernquist, 1992, 1996; Mihos & Hernquist, 1996). En un trabajo reciente, Lambas et al. (2012) encontraron que, para una dada masa estelar total del sistema, los pares constituidos por galaxias de luminosidad similar son significativamente más eficientes (en un factor  $\sim 2$ ) a la hora de formar nuevas estrellas, en relación a los pares menores (formados por dos galaxias con un cociente de luminosidad relativamente grande) y a una muestra de control de galaxias no interactuantes. Este resultado sugiere que las características particulares de la interacción y la relación de luminosidad entre los miembros del par son parámetros importantes en la caracterización de las propiedades de galaxias.

Las galaxias en grupos compactos son predominantemente rojas y pasivas (Brasseur et al., 2009). Estas galaxias residen en ambientes de alta densidad locales, sin embargo, la dispersión de la velocidad de grupos compactos es menor que la de cúmulos (Hickson et al., 1992), por lo tanto este es un escenario ideal para investigar interacciones y fusiones de galaxias. Más del 50% de las galaxias en grupos compactos son de tipo morfológico temprano (Hickson, Kindl & Huchra, 1988; Palumbo et al., 1995). La fracción de las galaxias rojas y de tipo temprano es mayor en grupos compactos que en grupos difusos y las galaxias en estos sistemas poseen sistemáticamente, en promedio, menor tamaño, mayor índice de concentración y mayor brillo superficial que las galaxias en el campo y en grupos difusos (Coenda et al., 2012). A través de observaciones de alta resolución angular obtenidas con el Very Large Array (VLA), Verdes-Montenegro et al. (2001) encontraron que los grupos compactos son deficientes en contenido de HI y que las galaxias individuales en estos sistemas muestran un mayor grado de deficiencia que los grupos como un todo (24% del HI esperado). En la mayoría de los casos esto podría ser consecuencia

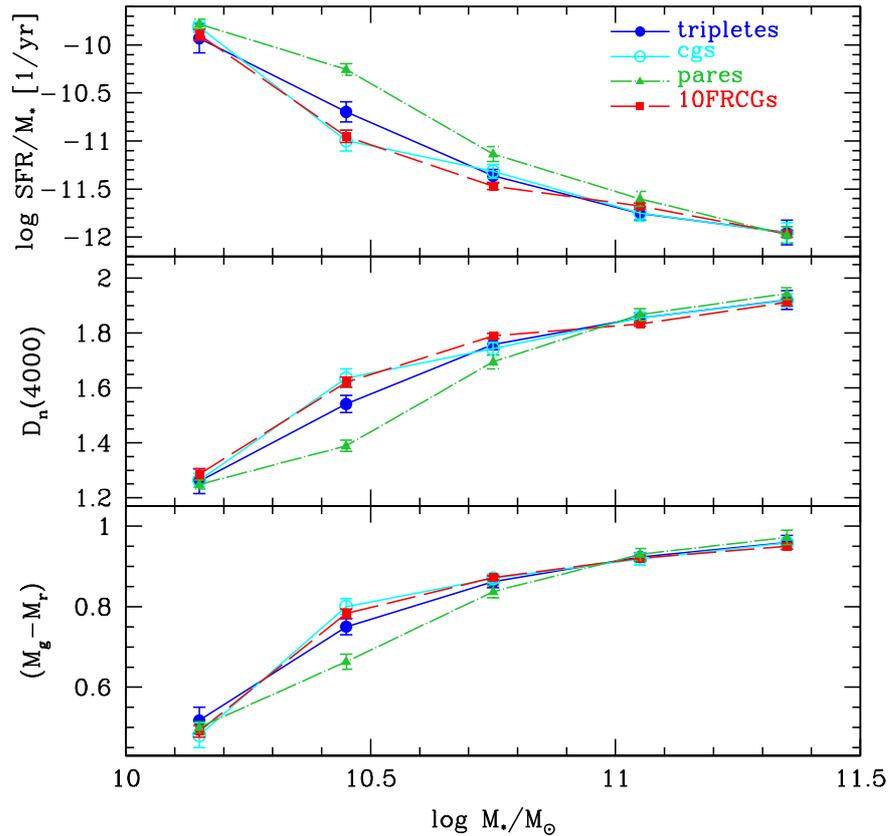
de una eficiente extracción del gas de las galaxias individuales que entra en el medio intra-grupo. Aunque las interacciones entre galaxias tienden a impulsar la formación estelar, las galaxias en grupos compactos presentan tasas de formación estelar similares a las encontradas para una muestra de control de galaxias aisladas, con igual luminosidad en la banda  $J$  y que no presentan fuertes signos de interacción (Tzanavaris et al., 2010). Reforzando estos resultados Brasseur et al. (2009), utilizando simulaciones, encontraron que la mayoría de las galaxias en grupos compactos son rojas, con bajo contenido de gas y baja tasa de formación estelar específica.

De manera de investigar si las galaxias en tripletes poseen propiedades similares a las galaxias en grupos compactos o si estas galaxias son semejantes a galaxias en otros sistemas, se han calculado los valores medios de  $\log SFR/M_*$ , del índice  $D_n(4000)$  y del índice de color ( $M_g - M_r$ ), en función de la masa en estrellas, para la muestra de tripletes y para las muestras de control de *cgs*, pares y 10FRCGs (Figura 6.3).

En general, las galaxias de la muestra de pares presentan valores medios que se corresponden con galaxias formantes, azules y con poblaciones estelares jóvenes. Por el contrario, las galaxias en tripletes presentan un comportamiento similar a las galaxias en *cgs* y 10FRCGs: valores menores de  $\log SFR/M_*$ , colores más rojos y valores más altos del índice  $D_n(4000)$ .

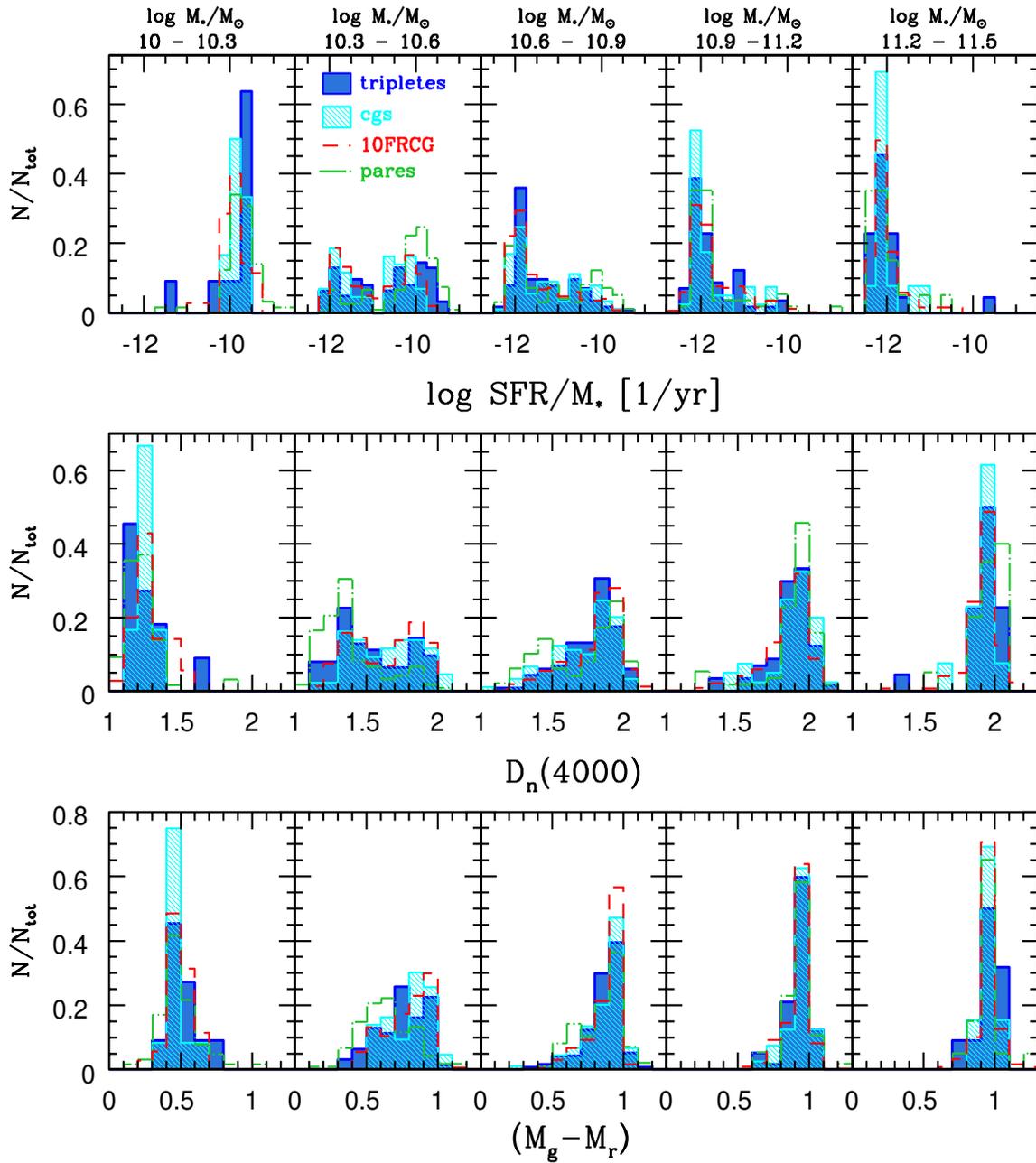
En los intervalos de menor masa en estrellas de la figura 6.3 se puede apreciar que las galaxias presentan una tendencia a tener mayores valores de  $\log SFR/M_*$ , menores índices  $D_n(4000)$  y colores más azules. En el intervalo más bajo de masa estelar, los valores medios de las propiedades de las galaxias en los diferentes sistemas son similares. Desde los tres últimos intervalos de mayor masa en estrellas puede apreciarse que la diferencia entre los valores medios de las propiedades de las galaxias en los sistemas bajo análisis es despreciable. En estos rangos de masa los sistemas presentan una población dominante de galaxias rojas, con baja formación estelar y alto índice  $D_n(4000)$ . Estos resultados están de acuerdo con el trabajo de Kauffmann et al. (2003) que sugieren que para masas en estrellas superiores a  $3 \times 10^{10} M_\odot$  existe un incremento en la fracción de galaxias con poblaciones estelar envejecidas, morfologías tipo bulbo y baja eficiencia en formar nuevas estrellas.

Las distribuciones de  $\log SFR/M_*$ ,  $D_n(4000)$  y color ( $M_g - M_r$ ) en diferentes



**Figura 6.3:** Valores medios de  $\log SFR/M_*$  (panel superior), índice  $D_n(4000)$  (panel del medio) e índice de color  $(M_g - M_r)$  (panel inferior), en 5 intervalos de  $\log M_*/M_\odot$ , para las muestras analizadas en esta sección (ver referencias en la figura). Las barras de error han sido calculadas utilizando técnicas bootstrap.

intervalos de  $\log M_*/M_\odot$  se muestra en la figura 6.4, para las muestras de sistemas analizadas en esta sección. Desde esta figura se observa que la distribución de las galaxias en el primer intervalo de masa es unimodal y se corresponde con valores elevados de formación estelar ( $\log SFR/M_* > -10.5$ ), con colores azules ( $(M_g - M_r) < 0.75$ ) y con valores bajos del índice  $D_n(4000)$  ( $D_n(4000) < 1.6$ ). Para los dos siguientes intervalos de masa en estrellas las galaxias presentan una distribución bimodal, con una fracción considerable de galaxias rojas con baja formación estelar y poblaciones estelares envejecidas. En particular, para el segundo intervalo de  $\log M_*/M_\odot$ , la distribución de las galaxias en tripletes tiende, levemente, a ser similar a la distribución de las galaxias en pares, mientras que las galaxias en *cgs* presentan una distribución más consistente con las galaxias en la muestra 10FRCGs. Al considerar las galaxias con masas mayores que  $\log M_*/M_\odot = 10.9$ , casi no hay diferencias entre las distribuciones de las muestras analizadas debido al efecto de la masa sobre las propiedades de las galaxias, descrito anteriormente.



**Figura 6.4:** Distribuciones de  $\log SFR/M_*$  (panel superior), índice  $D_n(4000)$  (panel del medio) e índice de color  $(M_g - M_r)$  (panel inferior) en 5 intervalos de  $\log M_*/M_\odot$ , para las muestras de galaxias analizadas en esta sección (ver referencias en la figura).

A partir del análisis de las figuras 6.3 y 6.4 se puede concluir que las galaxias en la muestra de sistemas triples presentan tasas de formación estelar, colores y poblaciones estelares que se comportan de manera similar a las galaxias en grupos compactos y cúmulos. Por el contrario, los miembros de pares de galaxias presentan indicadores de actividad de formación estelar sistemáticamente superiores.



---

# Capítulo 7

## Propiedades globales de sistemas triples

---

### 7.1. Generalidades

La proximidad y las velocidades relativamente bajas de las galaxias miembro de tripletes presentan un escenario ideal para las interacciones de galaxias y fusiones, situando a estos sistemas en un posible estado de colapso gravitatorio en curso. Análisis dinámicos de sistemas de galaxias sugieren que las interacciones son comunes en sistemas compactos y que los mismos evolucionan afectados por mecanismos como la fricción dinámica fusionándose finalmente en una única galaxia (Barnes, 1992).

Diaferio et al. (1994) realizaron simulaciones de N-cuerpos no disipativas y encontraron que las configuraciones compactas son reemplazadas continuamente por nuevos sistemas, debido a que dentro de un mismo grupo rico en colapso, sistemas como los grupos compactos de galaxias se forman continuamente. Así mismo se sugiere que grupos fósiles son el resultado de fusiones de galaxias en ambientes de baja densidad (Jones et al., 2003).

Desde el punto de vista observacional, Väisänen et al. (2008) combinaron imágenes en el infrarrojo cercano y espectroscopía óptica con imágenes de archivo del Telescopio Espacial Hubble e imágenes más espectroscopía del observatorio Spitzer,

revelando que una de las galaxias que es luminosa en infrarrojo (LIRG), IRAS 19115-2124, es en realidad un sistema triple, donde el fenómeno LIRG está dominado por la más pequeña de las componentes. Mendes de Oliveira & Carrasco (2007) realizaron mediciones espectroscópicas del grupo compacto SDSS CG6 (Lee et al., 2004) utilizando el espectrógrafo “Gemini Multiobject Spectrograph” (GMOS, Hook et al., 2004) del observatorio Gemini Sur, encontrando que la fusión de las cuatro galaxias centrales en este grupo podrían formar una galaxias de magnitud  $M'_r \sim -23.4$ , que es la magnitud típica de las galaxias más luminosas de grupos fósiles. Así mismo algunos grupos compactos están rodeados por halos de gas caliente emisores en rayos X que sugieren que estos sistemas poseen un contenido considerable de materia oscura. Una galaxia elíptica formada por la fusión de un grupo de este tipo puede mantener su halo ya que este no se ve afectado fuertemente por la fusión (Ponman & Bertram, 1993). Utilizando observaciones de rayos X del satélite “ROSAT”, Ponman et al. (1994) encontraron un posible candidato a grupo fósil que posee una luminosidad alta en rayos X y morfología similar a la de las galaxias elípticas gigantes en los centros de cúmulos, pero sin embargo es un sistema aislado. Estos autores proponen que las propiedades ópticas de este grupo fósil son consistentes con un origen correspondiente a los restos de un grupo compacto típico fusionado.

En relación a pares de galaxias Lambas et al. (2012) analizaron las propiedades globales de sistemas en interacción que pueden fusionarse en una única galaxia. A través de la suma de la masa estelar y tasa de formación estelar de las galaxias miembro de pares, estos autores exploraron la eficiencia global de formación estelar en estos sistemas encontrando que, para una dada masa estelar total, las fusiones mayores (formadas por dos galaxias cuyo cociente de luminosidades es menor a 0.33) son significativamente más eficientes en formar nuevas estrellas, con respecto a una muestra de fusiones menores y una muestra control de galaxias no interactuantes.

En este capítulo se analizarán las propiedades de las galaxias de los triplete en su conjunto, comenzando por un estudio de las correlaciones de las propiedades de las tres galaxias del sistema y luego realizando un análisis de las propiedades globales de los triplete, siguiendo la metodología de Lambas et al. (2012).

## 7.2. Análisis de correlaciones de propiedades

Brasseur et al. (2009) encuentran a través de un análisis utilizando catálogos sintéticos, que la mayoría de las galaxias en grupos compactos que son azules, ricas en gas y/o tienen altas tasas de formación estelar, son galaxias intrusas. Los resultados obtenidos en el capítulo 6 sugieren que en la muestra de sistemas triples existe una población de galaxias azules y formadoras de estrellas, compuestas principalmente por objetos de baja masa estelar.

En el capítulo 3 se utilizó un catálogo sintético para analizar la completitud, pureza y contaminación por sistemas espurios del algoritmo desarrollado para la identificación de tripletes de galaxias. Se encontró que para el caso de los tripletes espectroscópicos aislados la completitud es del orden del 67% y alcanza valores mayores ( $\sim 85\%$ ) en el caso de sistemas inmersos en halos de materia oscura menos masivos. Así mismo la contaminación por sistemas espurios posee valores bajos ( $\sim 3.5\%$ ). Sin embargo, con el fin de evaluar la probabilidad de que las galaxias azules en la muestra de tripletes sean galaxias intrusas, resulta interesante determinar si las propiedades de las galaxias en la muestra de sistemas triples están correlacionadas o, por el contrario, pueden ser explicadas a través de un muestreo aleatorio.

Para este fin se utilizó la muestra de tripletes espectroscópicos aislados y se diferenció entre galaxias que poseen colores azules y galaxias rojas según el índice de color ( $M_g - M_r$ ) sea menor o mayor que 0.75, respectivamente. También se distinguió entre galaxias con formación estelar activa y galaxias no formantes según  $\log \text{SFR}/M_* \geq -10.75$  o  $\text{SFR}/M_* < -10.75$  y galaxias dominadas por poblaciones estelares jóvenes o aquellas que poseen poblaciones estelares envejecidas de acuerdo a un valor límite del índice  $D_n(4000) = 1.6$ .

Se consideraron las siguientes configuraciones de las propiedades de las galaxias en tripletes:

- (1a) : 3 galaxias azules
- (1b) : 3 galaxias con formación estelar activa
- (1c) : 3 galaxias con poblaciones estelares jóvenes
- (2a) : 3 galaxias rojas
- (2b) : 3 galaxias no formantes
- (2c) : 3 galaxias con poblaciones estelares envejecidas

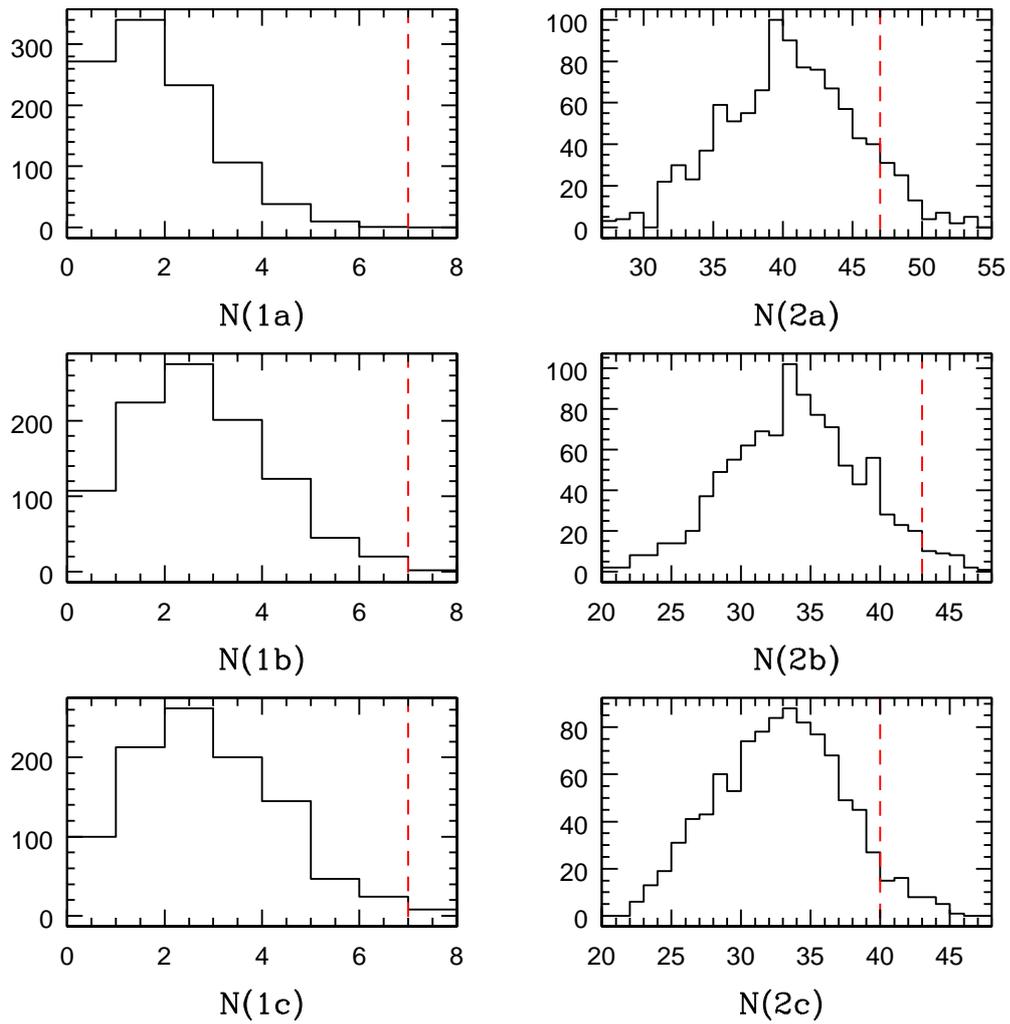
Luego se computó el número de sistemas que verifican cada una de estas categorías de manera independiente, encontrándose 7 tripletes que verifican la condición (1a), en lo que sigue se llamará a estos 7 sistemas tripletes azules. Estos tripletes azules también verifican las combinaciones (1b) y (1c). Es decir que las galaxias que forman estos sistemas poseen colores azules, altas tasas de formación estelar y poblaciones estelares jóvenes. En la muestra analizada hay 47 tripletes que verifican la combinación (2a), que serán considerados tripletes rojos. De estos 47 objetos, 43 verifican también la combinación (2b) y 40 la (2c). Es decir que no todas las galaxias en los tripletes rojos poseen también  $SFR/M_* < -10.75$  e índice  $D_n(4000) > 1.6$ .

La finalidad de este análisis es obtener la probabilidad de que estas configuraciones particulares de las propiedades de las galaxias en tripletes puedan ser explicadas por un proceso de muestreo aleatorio. Se llamará a esta probabilidad  $P$ . De este modo si el valor de  $P$  es bajo, entonces existe mayor probabilidad que exista una correlación física entre las propiedades de las galaxias en sistemas triples, lo que favorece que estos sistemas sean considerados como sistemas reales.

Se procedió a generar catálogos aleatorios de tripletes a través de la re-asignación aleatoria de las galaxias de la muestra a 92 nuevos sistemas. De este modo se rompe el lazo físico que puede existir entre las galaxias que componen los tripletes reales y se generan catálogos de sistemas triples compuestos por galaxias que poseen baja probabilidad de que sus propiedades estén correlacionadas.

Se realizaron 1000 catálogos aleatorios con el fin de utilizar técnicas bootstrap para calcular el valor de  $P$  para cada una de las categorías descriptas anteriormente. Este procedimiento permite obtener el número esperado de sistemas que tienen estas combinaciones por casualidad y compararlo con el valor obtenido para la muestra real de tripletes.

La figura 7.1 muestra la distribución del número de sistemas que verifican las combinaciones descriptas anteriormente, para cada catálogo aleatorio de tripletes. A partir de los valores medios de las distribuciones se observa que si las combinaciones de las propiedades de las galaxias de la muestra real de tripletes fueran al azar, entonces el número más probable de sistemas que verifiquen la combinación (1a) sería 1, para las combinaciones (1b) y (1c) el valor más probable sería 2, en el caso de la combinación (2a) sería 40, para (2b) 32 y para (2c) 33.



**Figura 7.1:** Distribución del número de sistemas que verifican las combinaciones (1a) (panel izquierdo superior), (1b) (panel izquierdo medio), (1c) (panel izquierdo inferior), (2a) (panel derecho superior), (2b) (panel derecho medio) y (2c) (panel derecho inferior), para las 1000 muestras aleatorias de tripletes. Las líneas verticales de trazos corresponden a los valores obtenidos para la muestra real de tripletes.

La probabilidad  $P$  para cada combinación se calculó como  $P = N_{rec}/N_t$ . Siendo  $N_{rec}$  el número de veces que el valor real de cada combinación se obtiene en los  $N_t = 1000$  catálogos aleatorios. A través del análisis de  $P$  se encontró que la probabilidad aleatoria que 7 tripletes satisfagan la combinación (1a) es 0%, para la combinación (1b) el valor encontrado para  $P$  es 0.2%, y para (1c) es 0.8%. En el caso de la combinación (2a) la probabilidad de 47 sistemas es 3.1%, para los 43 sistemas en la combinación (2b) el valor de  $P$  es 1% y la probabilidad aleatoria de 40 sistemas verificando la combinación (2c) es 1.5%. La tabla 7.1 resume estos valores.

**Tabla 7.1:** Nombre de la combinación, descripción, valor real de sistemas satisfaciendo cada combinación y la probabilidad  $P$  que estos valores puedan ser obtenidos a través de un muestreo aleatoria.

Nombre	Descripción	Número de tripletes	$P$
(1a)	3 galaxias con $(M_g - M_r) \leq 0.75$	7	0%
(1b)	3 galaxias con $\log \text{SFR}/M_* \geq -10.75$	7	0.2%
(1c)	3 galaxias con $D_n(4000) \leq 1.6$	7	0.8%
(2a)	3 galaxias con $(M_g - M_r) > 0.75$	47	3.1%
(2b)	3 galaxias con $\log \text{SFR}/M_* < -10.75$	43	1%
(2c)	3 galaxias con $D_n(4000) > 1.6$	40	1.5%

Los resultados obtenidos de este análisis indican que tanto los tripletes azules como los rojos poseen una combinación particular de sus galaxias miembro que no puede ser explicada por un muestro aleatorio. En particular, se puede concluir que los sistemas que incluyen galaxias azules, formadoras de estrellas, con poblaciones estelares jóvenes, tienen una alta probabilidad de ser sistemas reales y no una simple configuración de galaxias intrusas. En apoyo a este resultado, Hernández-Toledo et al. (2011) analizaron una muestra de tripletes derivada desde el catálogo de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988) y encontraron que son sistemas ricos en galaxias con morfología tipo espiral, en su mayoría de tipo tardío, con un exceso de  $\sim 0.6$  mag en la luminosidad azul global en comparación con las galaxias de campo.

### 7.3. Masa estelar total del triplete y su influencia en las propiedades de las galaxias miembro

En la sección anterior, se encontró que las correlaciones de las propiedades de las galaxias en tripletes no pueden ser explicadas a través de un muestreo aleatorio. En particular, hay siete tripletes que están compuestos por galaxias azules con poblaciones estelares jóvenes y con formación estelar activa. En esta sección se investiga la dependencia de las propiedades de las galaxias en tripletes con la masa estelar total del sistema diferenciando entre tripletes azules y rojos.

En el capítulo 6 se encontró que las propiedades de las galaxias en tripletes son similares a las propiedades de las galaxias en grupos compactos. Por este motivo en esta sección se compararán los resultados obtenidos para sistemas triples con los de

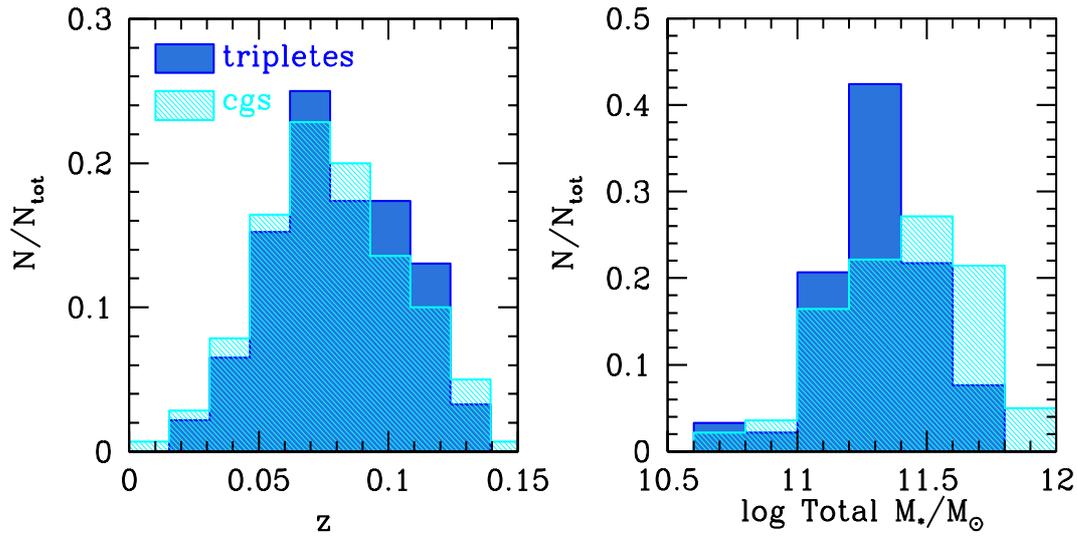
grupos compactos. El análisis conjunto de estos resultados también está fundamentado en que estos sistemas ocupan un rango similar de masa estelar total, hecho que no se sostiene para pares de galaxias ni para cúmulos, siendo los primeros en general sistemas menos masivos y los segundos sistemas compuestos por un gran número de galaxias y las estructuras más masivas del universo.

Se utilizarán en el presente análisis las muestras de tripletes espectroscópicos aislados y la muestra de grupos compactos descrita en la sección 6.3 del capítulo 6. De manera de asignar a los tripletes y grupos compactos analizados un redshift correspondiente a cada sistema ( $z_s$ ) se promediaron los valores de los redshifts individuales de sus galaxias miembro. Además, con el fin de evitar sesgos debidos a diferencias en la distribución de redshift se realizó una muestra de control de los grupos compactos de manera de reproducir la distribución de redshift de los sistemas triples.

En el panel izquierdo de la figura 7.2 se muestra la distribución de redshift del sistema para tripletes y grupos compactos. El valor obtenido de  $p$  luego de una prueba KS es mayor que 0.05 por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula de que el redshift de tripletes y grupos compactos provengan desde la misma distribución. Bajo estas restricciones las muestras de tripletes y grupos compactos (cgs) utilizadas en esta sección comprende 92 y 140 sistemas, respectivamente.

En el panel derecho de la figura 7.2 se muestra la distribución de la masa total en estrellas ( $\log \text{Total } M_*/M_\odot$ ) para la muestra de tripletes y grupos compactos descritas anteriormente. La masa total fue calculada sumando las masas en estrellas individuales de cada galaxia miembro del sistema. Se puede apreciar que los grupos compactos tienen un mayor contenido de masa en estrellas que los tripletes. Este es un resultado esperado ya que los tripletes están formados por tres galaxias brillantes mientras que los grupos compactos analizados en este trabajo, a pesar de poder poseer galaxias más débiles que  $M_r = -20.5$ , están compuestos en su mayoría por cuatro miembros.

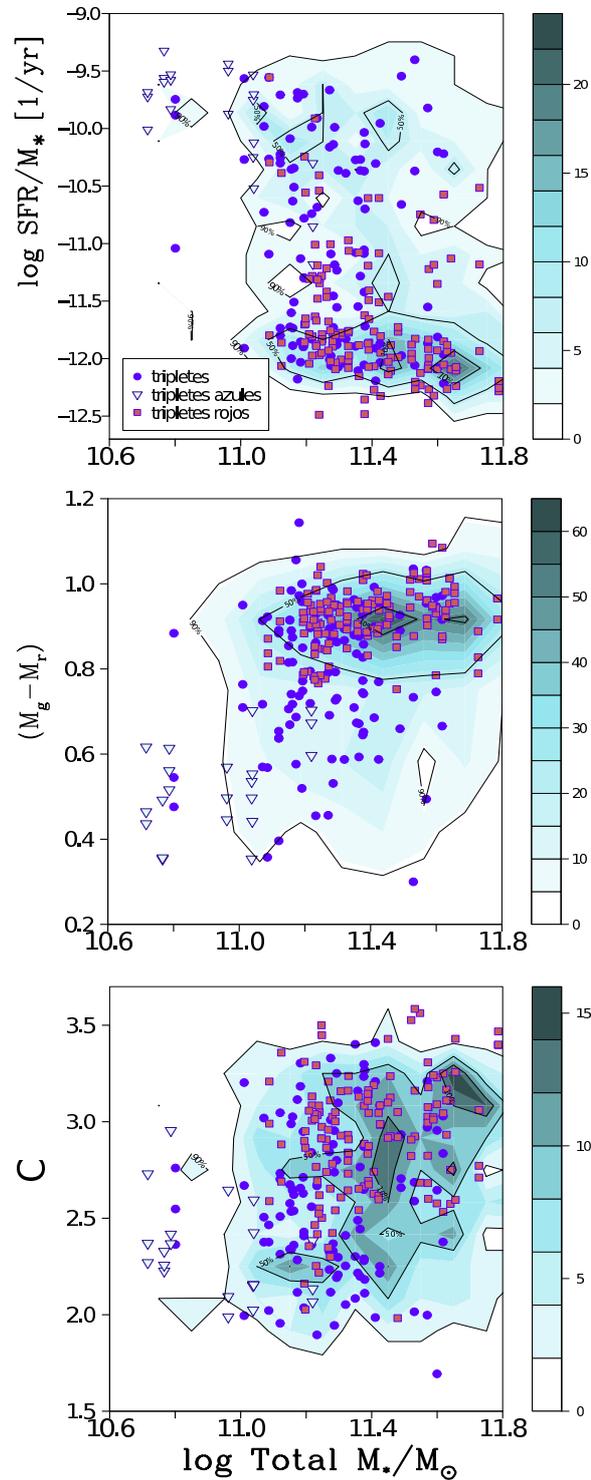
De manera de evitar sesgos debidos a esta diferencia en la masa de los sistemas se analizaron las propiedades de las galaxias de tripletes y de la muestra control de grupos compactos, en función de la masa estelar total en el rango que ocupa la muestra de sistemas triples ( $10.6 < \log \text{Total } M_*/M_\odot < 11.8$ ).



**Figura 7.2:** Distribución normalizada de redshift del sistema (panel izquierdo) y masa total en estrellas (panel derecho) para tripletes y grupos compactos.

En la figura 7.3 se muestran las propiedades de las galaxias en función de la masa total del sistema. Los contornos en esta figura representan las propiedades de las galaxias miembro de grupos compactos y los puntos corresponden a galaxias en tripletes. Se han considerado por separado tripletes azules, tripletes rojos y tripletes que no satisfacen ninguna de estas categorías. El panel superior muestra la tasa de formación estelar específica ( $\log SFR/M_*$ ), el panel intermedio, el índice de color ( $M_g - M_r$ ) y el panel inferior el índice de concentración  $C$ . Este último parámetro se define como  $C = r_{90}/r_{50}$  donde  $r_{90}$  y  $r_{50}$  representan los radios que contienen el 90 y 50% de la luz de Petrosian de la galaxia (Petrosian, 1976), respectivamente. Este parámetro es un indicador apropiado de la bimodalidad en la morfología de las galaxias: las galaxias de tipos morfológicos tempranos poseen  $C > 2.6$  mientras que las galaxias de tipos tardíos usualmente presentan un valor de  $C < 2.6$  (Strateva et al., 2001).

A partir de la figura 7.3 se puede apreciar, como se esperaba, que los grupos compactos tienden a poseer una cola hacia masas estelares totales mayores. Sin embargo, en el intervalo de masas de los sistemas triples, los miembros de tripletes y grupos compactos presentan un comportamiento similar. En esta figura también se observa que los tripletes azules son los sistemas que poseen menor masa estelar total. Así mismo, las galaxias en estos tripletes muestran una actividad de formación estelar mayor y, en la mayoría de los casos, valores del índice de concentración



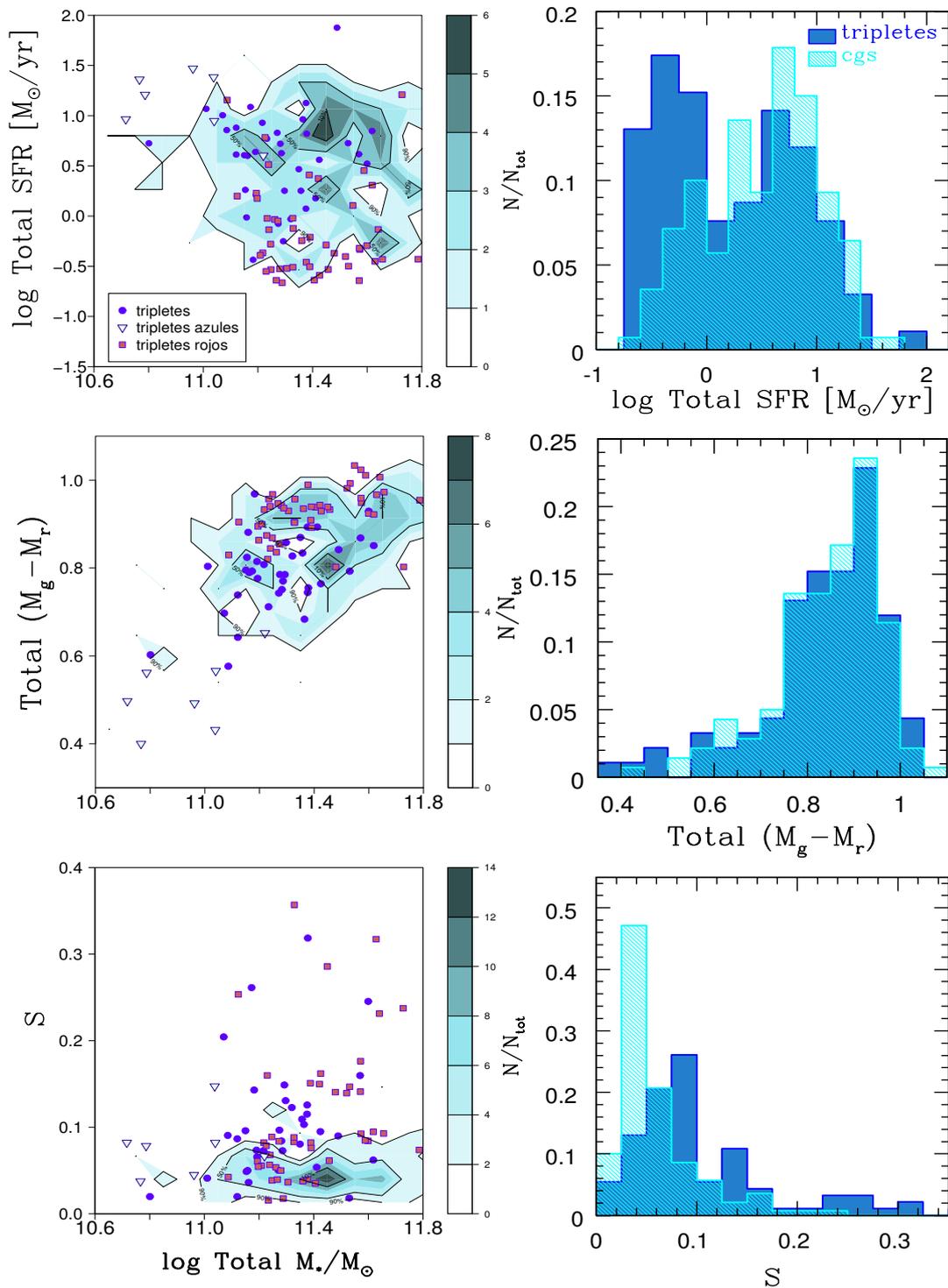
**Figura 7.3:** Tasa de formación estelar específica  $\log SFR/M_*$  (Panel superior), índice de color  $(M_g - M_r)$  (panel del medio) e índice de concentración  $C$  (panel inferior) en función de  $\log \text{Total } M_*/M_\odot$ . Los contornos llenos representan las propiedades de grupos compactos, en negro se marcan los contornos correspondientes al 10, 50 y 90 % de las galaxias en esta muestra. Los puntos representan las propiedades de los tripletes, distinguiendo entre tripletes rojos, tripletes azules y tripletes que no caen en ninguna de estas categorías (ver referencias en la figura).

$C < 2.6$ , que se corresponde con morfologías tipo disco. Por otro lado, debido a la correlación entre las propiedades de las galaxias con la masa estelar, las galaxias en tripletes rojos habitan sistemas con contenidos totales de masa en estrellas altos. Del análisis del índice de concentración se observa que la mayoría de estos objetos poseen morfología que se corresponde con galaxias elípticas y presentan baja eficiencia en la formación de nuevas estrellas.

#### 7.4. Análisis de sistemas triples como un todo

Dado que los tripletes presentan propiedades dinámicas que los sitúan en un estado de posible colapso gravitatorio que puede derivar en un grupo fósil, en esta sección se analizarán las distintas propiedades globales de los tripletes de galaxias, considerando el sistema como un todo. También se realizará el mismo análisis en grupos compactos con el fin de comparar los resultados obtenidos para estos sistemas. Para ello se utilizarán las muestras de tripletes y grupos compactos definidas en la sección anterior. Con el objetivo de complementar el análisis desarrollado anteriormente, también se explorará la dependencia de la tasa total de formación estelar y el color total en función de la masa estelar total del sistema. De manera de garantizar que los sistemas bajo análisis no estén limitados por el criterio de selección comúnmente utilizados en la determinación de la compacidad de los mismos, se calculó para la muestra de grupos compactos el parámetro de compacidad  $S$  definido en la sección 5.3 del capítulo 5. Los radios de los grupos compactos se definen, según el criterio de Hickson, como el círculo más pequeño que contiene los centros geométricos de los miembros del sistema. En el cálculo de  $S$  para sistemas triples se emplea el valor de  $r_{max}$  que es el círculo mínimo que contiene los centros de las galaxias del triplete. Luego, por su definición, este criterio de compacidad es homogéneo para ambas muestras.

Los paneles izquierdos en la figura 7.4 muestran la tasa de formación estelar total ( $\log \text{Total } SFR$ ), el color global ( $\text{Total } (M_g - M_r)$ ) y la compacidad ( $S$ ), en función del contenido total de masa estelar, para los tripletes y para la muestra de grupos compactos. En los paneles de la derecha de esta figura se muestran las distribuciones de estas propiedades para ambas muestras.



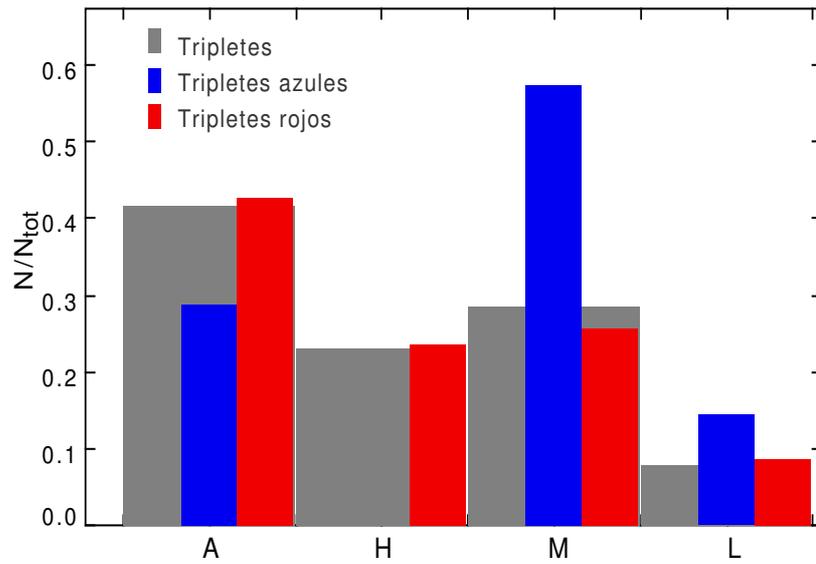
**Figura 7.4:** *Izquierda:* Tasa de formación estelar total  $\log \text{Total SFR}$  (panel superior), color  $\text{Total } (M_g - M_r)$  (panel del medio) y compactividad  $S$  (panel inferior), en función de  $\log \text{Total } M_*/M_\odot$ . Los contornos llenos representan las propiedades de grupos compactos, en negro se marcan los contornos correspondientes al 10, 50 y 90% de las galaxias en esta muestra. Los puntos representan las propiedades de los tripletes, distinguiendo entre tripletes rojos, tripletes azules y tripletes que no caen en ninguna de estas categorías (ver referencias en la figura).

*Derecha:* Distribuciones normalizadas de  $\log \text{Total SFR}$  (panel superior), color  $\text{Total } (M_g - M_r)$  (panel intermedio) y compactividad  $S$  (panel inferior) para tripletes y grupos compactos (ver referencias en la figura).

De la misma manera que para las galaxias individuales, se puede observar que los tripletes azules tienen una actividad total de formación estelar alta y tienden a ser sistemas globalmente menos masivos. Los tripletes rojos son los objetos más masivos y muestran una tasa de formación estelar total menor. Según esta figura, también se puede apreciar que existe una correlación entre la tasa de formación estelar total y la masa estelar total de los tripletes, mientras que los grupos compactos presentan una tendencia aproximadamente constante. Esto se refleja en la distribución de la tasa de formación estelar total: los tripletes son claramente bimodales en este parámetro, mientras que la distribución de grupos compactos es más consistente con una única población. En cuanto al color total, existe una correlación positiva con la masa estelar total en ambas muestras. Como era de esperar por su definición, los tripletes azules se encuentran en la cola azul de baja masa de la distribución.

A partir del análisis del parámetro  $S$  en función de la masa estelar total, se puede apreciar que la compacidad de los tripletes aumenta hacia masas estelares totales mayores mientras que los grupos compactos muestran una tendencia casi constante. Además, a partir de la distribución de  $S$ , se observa que la luz se encuentra aún más concentrada en los sistemas triples que en los grupos compactos de galaxias. Desde esta figura también se aprecia que los tripletes azules tienden a poseer configuraciones menos compactas. Luego, los tripletes azules están formados por galaxias menos masivas y que se encuentran más separadas dentro del sistema, este escenario podría estar favoreciendo la formación estelar en las galaxias en estos tripletes.

En base a estos resultados, es interesante realizar un análisis de las configuraciones en el mapa-AA (ver capítulo 5) para los tripletes rojos y azules. La figura 7.5 muestra la distribución de configuraciones para la muestra de tripletes espectroscópicos donde se ha distinguido entre tripletes azules y rojos. En esta figura puede apreciarse que los tripletes rojos reproducen la distribución general de sistemas, mientras que los tripletes azules prefieren configuraciones tipo intermedia y lagrangiana (M y L, respectivamente), donde las separaciones entre galaxias miembro del sistema son del mismo orden. También se observa una población de tripletes azules con configuraciones lineales (A) pero ninguno de estos sistemas posee configuraciones de tipo jerárquico (H), que son las configuraciones más compactas según lo encontrado en el capítulo 5.



**Figura 7.5:** Distribución de las configuraciones en el mapa-AA de los tripletes espectroscópicos aislados. Se ha distinguido entre tripletes rojos y tripletes azules.

Los resultados encontrados en este capítulo sugieren que podría considerarse a los tripletes azules como un estado evolutivo anterior a los tripletes rojos, donde las galaxias se encuentran en etapas iniciales del colapso en el sistema.



---

# Conclusiones

---

En esta tesis se han confrontado diversas hipótesis relacionadas a sistemas triples de galaxias y se ha aplicado una metodología de trabajo que ha derivado en resultados específicos para cada uno de los objetivos planteados. Estos resultados pueden resumirse en los siguientes items:

- En este trabajo se ha desarrollado un algoritmo para la identificación de sistemas triples de galaxias en el SDSS-DR7, basado en la selección de tres galaxias más brillantes que  $M_r = -20.5$  cercanas en distancia proyectada y diferencia de velocidad radial más un criterio de aislamiento que considera que no pueden existir vecinos significativos dentro de una distancia igual a  $0.5 h^{-1}\text{Mpc}$  desde el centro del triplete, asignado a la galaxia más brillante del sistema. Empleando datos con redshift espectroscópico en el rango  $0.01 \leq z \leq 0.14$ , se generó un catálogo de tripletes de galaxias que contiene 92 sistemas que poseen todas sus galaxias con información espectroscópica (tripletes espectroscópicos) más 45 sistemas formados por galaxias fotométricas y que poseen al menos una galaxia con espectroscopía (tripletes espectro-fotométricos). De manera de extender este catálogo a redshift intermedios se utilizaron redshifts fotométricos obteniéndose 5245 sistemas en el rango  $0.11 < z < 0.4$  (tripletes fotométricos). En todos los casos los sistemas obtenidos presentan un alto grado de aislamiento encontrándose alejados de regiones sobredensas correspondientes a cúmulos de galaxias.

- El catálogo total de sistemas triples compuesto por los tripletes espectroscópicos, los espectro-fotométricos y los fotométricos presenta una densidad numérica que se mantiene constante en función del redshift, lo que implica que el algoritmo desarrollado es eficiente para obtener un catálogo de sistemas triples con densidad numérica independiente de la distancia. Este resultado también implica que los redshifts fotométricos proporcionan información muy útil que permite completar la muestra de sistemas cercanos afectados por el efecto de colisiones de fibra del SDSS, así como ampliar la detección de sistemas a mayores distancias, donde los redshifts espectroscópicos no están disponibles de manera completa.
- De manera de cuantificar las tasas de completitud, pureza y contaminación de los catálogos obtenidos se empleó un catálogo sintético que permite obtener información de los sistemas en el espacio real y comparar los resultados con los obtenidos en el espacio de redshift. Se consideraron tripletes reales a aquellos sistemas donde las distancias reales entre galaxias miembro cumplen con ser menores que  $200 h^{-1}$  kpc y las tres galaxias pertenecen al mismo halo de materia oscura. El criterio de aislamiento consistió en exigir que no existan vecinos significativos dentro de  $0.5 h^{-1}$  Mpc del centro del sistema. Este criterio selecciona tripletes inmersos en halos de materia oscura con masas del orden de  $3 \times 10^{13} M_{\odot}$ , lo que implica que es efectivo en seleccionar tripletes que no se encuentren inmersos en halos muy masivos. Para el caso del catálogo de tripletes espectroscópico se implementó el algoritmo en el espacio de redshift espectroscópico y se encontró que para sistemas aislados la completitud es estable para todo el rango de redshift con un promedio del 67%, pudiendo alcanzar valores del orden del 85% para tripletes en halos menos masivos. Los sistemas inmersos en halos con masas mayores que  $3 \times 10^{13} M_{\odot}$  presentan una tasa de completitud del 54%. La pureza del catálogo es mayor para sistemas con  $z < 0.075$  pero se mantiene estable en todo el rango de redshift restante considerado. Los valores promedio de pureza obtenidos para todo el rango de masas del halo y para sistemas con halos con masas menores y mayores que  $3 \times 10^{13} M_{\odot}$  son 58%, 70% y 49% respectivamente. La contaminación por

sistemas espurios, definidos como los sistemas identificados en el espacio de redshift que no poseen todas sus galaxias inmersas en el mismo halo de materia oscura, es estable con el redshift con un valor promedio de  $\sim 3.5\%$  y no difiere significativamente para sistemas inmersos en halos de diferente masa.

- En el caso de la implementación de redshifts fotométricos se realizaron pruebas de completitud y contaminación considerando los errores de estas estimas en los datos del catálogo sintético, a través de la asignación de un error aleatorio al redshift espectroscópico obtenido a partir de una distribución gaussiana que representa las diferencias entre los valores de redshifts espectroscópicos y fotométricos de la muestra de galaxias principales del SDSS, es decir está centrada en cero y posee una dispersión  $\sigma_{phot} = 0.0227$ . Luego se corrió el algoritmo en el espacio de redshift fotométrico y se encontró que los tripletes aislados identificados poseen una tasa de completitud que no supera el 20 %, pudiendo tomar valores cercanos al 30 % si no se considera el aislamiento. La pureza del catálogo es del orden del 30 % y la contaminación por sistemas espurios es  $\sim 15\%$ . En ningún caso se encuentra fuerte dependencia con el redshift. Estos resultados indican que los errores asociados a los redshifts fotométricos poseen gran influencia en la identificación de sistemas triples, disminuyendo significativamente las tasas de completitud y pureza del catálogo final. Sin embargo las tasas de completitud, pureza y contaminación obtenidas en este trabajo están en acuerdo con las encontradas en la literatura para otros sistemas de galaxias (por ejemplo, McConnachie et al., 2008; Zandivarez et al., 2013).
- Debido al efecto de incompletitud por colisión de fibras que afecta a la MGS del SDSS, dos galaxias más cercanas que  $100 h^{-1}$  kpc no pueden ser resueltas a un redshift  $z > 0.1$ . De manera de cuantificar la influencia de este efecto sobre el catálogo espectroscópico se utilizó información de redshift fotométrico en el rango  $0.09 < z < 0.14$  de manera de incluir galaxias con  $r < 17.77$  y  $M_r < -20.5$  pero que no poseen mediciones espectroscópicas. Se encontró que en este rango de redshift el 90 % de los tripletes aislados espectroscópicos pueden ser recuperados. Los sistemas que se pierden incluyen aquellos que no verifican el criterio de aislamiento debido a la inclusión de galaxias brillantes

sin espectroscopía.

- Dado que la muestra de tripletes obtenida a través de la utilización de redshifts fotométricos se encuentra sujeta a un alto grado de contaminación, se realizó un análisis detallado de las propiedades de los sistemas triples y de las galaxias que los conforman, considerando la muestra de tripletes identificados empleando información de redshift espectroscópico. Cabe destacar que esta muestra comprende un avance importante en el análisis estadístico de sistemas triples ya que posee un mayor número de sistemas y abarca un rango mayor de redshift que la muestras de tripletes analizadas anteriormente en la literatura. Así mismo la muestra de tripletes fotométricos obtenida contiene sistemas candidatos a realizar un seguimiento espectroscópico de los mismos de manera de confirmar su categorización como sistemas físicos reales.
- Relacionado al análisis de configuraciones de los sistemas triples se empleó el criterio desarrollado por Agekyan & Anosova (1968) que se basa en realizar una serie de transformaciones de manera que las coordenadas  $(x, y)$  de las dos galaxias más alejadas entre sí que conforman el lado más largo de triángulo, sean  $(-0.5, 0)$ ,  $(0.5, 0)$ . De este modo la configuración del triplete queda definida por las coordenadas  $(x, y)$  de la tercer galaxia que verifican  $x \geq 0$ ;  $y \geq 0$  y  $(x + 0.5)^2 + y^2 \leq 1$  (mapa-AA). En este mapa existen cuatro regiones que corresponden con configuraciones lineales (A), jerárquicas (H), intermedias (M) o lagrangianas (L). De manera de corroborar que las configuraciones de los tripletes según su ubicación en el mapa-AA no están sesgadas por efectos de proyección, se analizaron las configuraciones de sistemas triples aislados obtenidos a partir de un catálogo sintético. De este modo se compararon las configuraciones reales en tres dimensiones de los tripletes con las configuraciones proyectadas de los mismos. Mediante este análisis se encontró que los sistemas M presentan mayor dispersión entre las diferentes zonas del mapa-AA proyectado. Las configuraciones H son las menos contaminadas pero los sistemas en proyección se ubican más cerca de la esquina inferior derecha del mapa. Así mismo las proyecciones producen un exceso de sistemas jerárquicos en comparación con las configuraciones reales. Estos resultados están de

acuerdo con los encontrados por Chernin et al. (1994). Sin embargo, en todos los casos más del 60% de los sistemas en proyección poseen configuraciones que se corresponden con las obtenidas en tres dimensiones, por lo que se puede concluir que el mapa-AA es una herramienta adecuada para analizar las configuraciones de sistemas triples ya que representa de manera consistente las configuraciones reales de los mismos.

- Se realizó una comparación entre la densidad de sistemas en cada área del mapa-AA para el catálogo de tripletes obtenido desde las simulaciones, para el catálogo de tripletes espectroscópicos obtenidos desde el SDSS y para una muestra de tripletes físicos aislados obtenida desde el catálogo “Isolated Triplets of Galaxies” (Karachentseva, Karachentsev & Lebedev, 1988). Según este análisis la mayoría de los tripletes del catálogo sintético así como los tripletes espectroscópicos presentan configuraciones A, pero la densidad de estos sistemas es mayor para los tripletes obtenidos desde las observaciones. Las densidades en las zonas H y L son del mismo orden para ambos catálogos mientras que los tripletes obtenidos a partir del catálogo sintético presentan mayor densidad en la zona de sistemas M. Los tripletes de la muestra de Karachentseva poseen mayor densidad de sistemas en la zona M y L, sin embargo al igual que en el caso de los tripletes espectroscópicos, no se observa un exceso de sistemas jerárquicos compuestos por dos galaxias muy próximas.
- De manera de caracterizar las propiedades dinámicas de los sistemas triples se estimaron el radio mínimo que contiene a las galaxias del triplete, la dispersión de velocidades, el tiempo de cruce y la compacticidad del sistema, para la muestra de tripletes espectroscópicos. Los valores obtenidos se compararon con los derivados para la muestra de tripletes de Karachentseva y para una muestra de grupos compactos seleccionados desde el catálogo A de McConachie et al. (2009). Desde este análisis comparativo puede concluirse que los tripletes espectroscópicos poseen parámetros dinámicos con valores intermedios entre los tripletes de la muestra de Karachentseva y los obtenidos para grupos compactos.
- Las diferentes configuraciones de los tripletes pueden reflejar diferentes etapas

dinámicas del sistema, sin embargo, debido a que las barras de error para los valores medios son grandes, sólo se encuentran tendencias leves a que las configuraciones lineales presenten valores mayores de radio mínimo y de dispersión de velocidades que se traducen en un tiempo de cruce mayor. Los sistemas L tienden a ser configuraciones más abiertas con valores menores de dispersión de velocidades y configuraciones menos compactas y los H presentan radios mínimos bajos y valores mayores de compacticidad.

- En lo referente a las propiedades de las galaxias en sistemas triples se analizaron los valores de  $M_*/M_\odot$ ,  $SFR/M_*$ , índice  $D_n(4000)$  y color ( $M_g - M_r$ ) de las galaxias en la muestra de tripletes espectroscópicos, según las configuraciones de los mismos. Se observa que no existe gran diferencia entre los miembros de tripletes con configuraciones A, H y M, mientras que los sistemas L presentan una tendencia en la media a reflejar poblaciones estelares con formación estelar menor, colores más rojos y poblaciones estelares más envejecidas que el resto de las configuraciones. Sin embargo las distribuciones correspondientes a las propiedades de las galaxias en estos sistemas presentan un comportamiento bimodal que no se observa en el resto de los sistemas, sobre todo en el caso de la tasa de formación estelar específica, donde se aprecia una población de galaxias formadoras de estrellas. Sin embargo al ser sólo 10 los sistemas que presentan configuraciones lagrangianas los errores en las estimas son grandes, por lo que debe considerarse que las tendencias obtenidas no poseen un grado elevado de significancia estadística.
- También se realizó un estudio comparativo de las propiedades de las galaxias pertenecientes a tripletes espectroscópicos con las propiedades de galaxias en grupos compactos, las diez galaxias más brillantes de cúmulos (excluyendo la galaxia más luminosa del sistema) y los miembros de pares. Se encontró que las galaxias en tripletes presentan tasas de formación estelar, colores y poblaciones estelares similares a las encontradas para galaxias en grupos compactos y cúmulos, en contraste con las galaxias en pares que poseen indicadores de actividad de formación estelar sistemáticamente mayores. Desde estos resultados se puede concluir que los tripletes de galaxias no deben ser considerados

como una extensión de sistemas pares con un tercer miembro extra.

- De manera de determinar si las propiedades de las galaxias en tripletes se encuentran fuertemente correlacionadas o, por el contrario, pueden ser explicadas por un muestreo aleatorio, se generaron 1000 catálogos aleatorios a través de una re-asignación al azar de las galaxias de la muestra tripletes espectroscópicos a 92 nuevos sistemas. De este modo se rompe el lazo físico que pueda existir entre las galaxias que componen los tripletes reales y se generan catálogos de sistemas triples compuestos por galaxias que poseen baja probabilidad de que sus propiedades estén correlacionadas. A partir de este análisis se concluyó que los sistemas compuestos por tres galaxias azules, formadoras de estrellas y con poblaciones estelares jóvenes (tripletes azules) poseen alta probabilidad de ser sistemas físicos reales y no una mera configuración de galaxias en proyección. Lo mismo se comprueba para tripletes compuestos por tres galaxias rojas, no formadoras de estrellas y con poblaciones estelares envejecidas (tripletes rojos), lo que pone de manifiesto el alto grado de correlación entre las propiedades de las galaxias miembro de sistemas triples.
- Debido a las propiedades dinámicas que caracterizan tanto a grupos compactos como tripletes, estos sistemas poseen alta probabilidad de terminar su vida fusionándose en una sola galaxia. Por este motivo se realizó un análisis comparativo de diversos parámetros globales, tales como la tasa de formación estelar total y colores globales encontrando que grupos compactos y tripletes poseen un comportamiento similar. Por otro lado se encontró que los tripletes azules son sistemas globalmente menos masivos y muestran una actividad de formación estelar total eficiente mientras que los tripletes rojos poseen un contenido mayor de masa en estrellas y una baja eficiencia total en formar nuevas estrellas. En relación a la compacticidad, definida como el porcentaje del área total del sistema que está ocupada por la luz de las galaxias, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la luz se encuentra más concentrada en los sistemas triples analizados que en los grupos compactos de galaxias.
- Por otro lado los tripletes azules tienden a poseer configuraciones menos compactas por lo que estos sistemas, formados por galaxias menos masivas y más

separadas dentro del sistema, presentan un escenario que podría estar favoreciendo la formación estelar de las galaxias en estos tripletes. Debido a estos resultados se realizó un análisis de las configuraciones en el mapa-AA para los tripletes rojos y azules, encontrándose que los tripletes rojos reproducen la distribución general, mientras que los tripletes azules prefieren configuraciones tipo A y L donde las separaciones entre galaxias son similares y evitan las configuraciones de tipo H que son las configuraciones más compactas. Según estos resultados podría considerarse a los tripletes azules como un estado evolutivo anterior a los tripletes rojos, donde las galaxias se encuentran en etapas iniciales del colapso en el sistema.

Los resultados generales obtenidos en este trabajo sugieren que existe una población homogénea de sistemas triples compuestos por tres miembros luminosos, que poseen propiedades similares a los grupos compactos de galaxias. Basados en estos resultados se propone que los tripletes son una extensión natural de los grupos compactos a sistemas con un número menor de miembros. Además el catálogo de sistemas triples espectroscópicos obtenido en esta Tesis representa una muestra estadísticamente homogénea que posee el mayor número de objetos analizados hasta el momento en la literatura, lo que ha permitido realizar un estudio confiable de las propiedades de los sistemas triples y las galaxias que los conforman. Así mismo el catálogo de tripletes fotométricos contiene sistemas candidatos a realizar seguimiento espectroscópico de manera de corroborar su categorización como sistemas físicos reales y poder extender la muestra de tripletes espectroscópicos a distancias mayores de manera de poder realizar un análisis evolutivo de los sistemas triples de galaxias.

---

# Apéndice

## Muestra de los catálogos de sistemas triples obtenidos en esta Tesis

---

En este Apéndice se presentan tres tablas que contienen información correspondiente a 10 tripletes seleccionados a partir de cada uno de los catálogos obtenidos en este trabajo: espectroscópicos, espectro-fotométricos y fotométrico, respectivamente. Los sistemas fueron obtenidos mediante inspección visual desde una submuestra correspondiente a los tripletes que poseen los valores más elevados de distancia al cúmulo vecino más cercano, por este motivo son representativos de los sistemas con mayor grado de aislamiento de las muestras. Las tablas incluyen la siguiente información: identificación del triplete (grid), identificación de la galaxia en el triplete (gxid), donde 1 corresponde a la galaxia menos brillante y 3 la de mayor luminosidad del sistema, ascensión recta en h:m:s (RA (J2000)), declinación en °:':'' (DEC (J2000)) y redshift ( $z$ ) de cada una de las galaxias de los sistemas seleccionados.

También se han incluido imágenes de estos tripletes obtenidas desde la base de datos del SDSS-DR7<sup>1</sup>

---

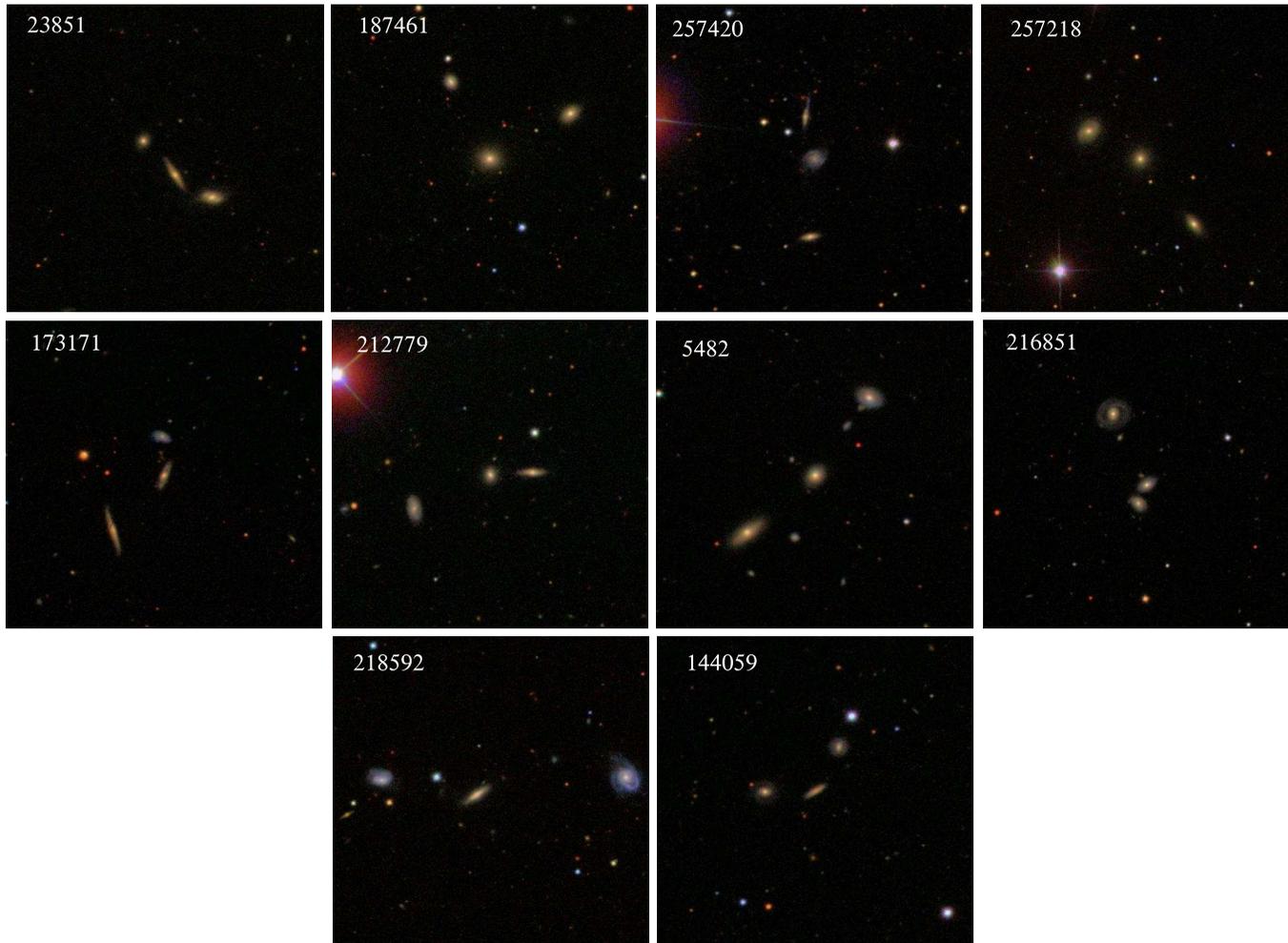
<sup>1</sup><http://cas.sdss.org/dr7/>



## Tripletes espectroscópicos

idg	idgx	RA (J2000)	DEC (J2000)	z
23851	1	02:59:00.28	+00:47:54.8	0.0887
23851	2	02:58:58.93	+00:47:32.4	0.0899
23851	3	02:58:57.36	+00:47:17.5	0.0909
187461	1	08:10:17.12	+51:53:11.8	0.0606
187461	2	08:10:08.88	+51:52:50.9	0.0605
187461	3	08:10:14.45	+51:52:21.1	0.0606
257420	1	08:32:20.42	+16:29:30.5	0.1018
257420	2	08:32:20.01	+16:29:02.8	0.1025
257420	3	08:32:20.21	+16:28:11.4	0.1031
257218	1	08:37:51.77	+18:44:54.4	0.0964
257218	2	08:37:54.18	+18:45:37.5	0.0961
257218	3	08:37:56.50	+18:45:55.7	0.0964
173171	1	09:49:23.43	+37:26:11.0	0.1068
173171	2	09:49:23.32	+37:25:45.4	0.1069
173171	3	09:49:26.06	+37:25:09.4	0.1072
212779	1	09:56:16.76	+33:24:48.2	0.0778
212779	2	09:56:22.81	+33:24:24.5	0.0776
212779	3	09:56:18.91	+33:24:46.5	0.0787
5482	1	12:40:21.98	+01:02:44.1	0.0818
5482	2	12:40:19.68	+01:03:35.2	0.0824
5482	3	12:40:24.87	+01:02:06.6	0.0814
216851	1	12:41:35.81	+40:09:48.1	0.0805
216851	2	12:41:35.34	+40:10:00.1	0.0802
216851	3	12:41:37.21	+40:10:46.8	0.0807
218592	1	12:45:39.97	+37:49:13.4	0.0527
218592	2	12:45:45.11	+37:49:23.0	0.0524
218592	3	12:45:31.91	+37:49:24.8	0.0535
144059	1	14:03:25.83	+41:52:01.8	0.1130
144059	2	14:03:24.51	+41:52:30.7	0.1129
144059	3	14:03:28.75	+41:52:01.3	0.1134





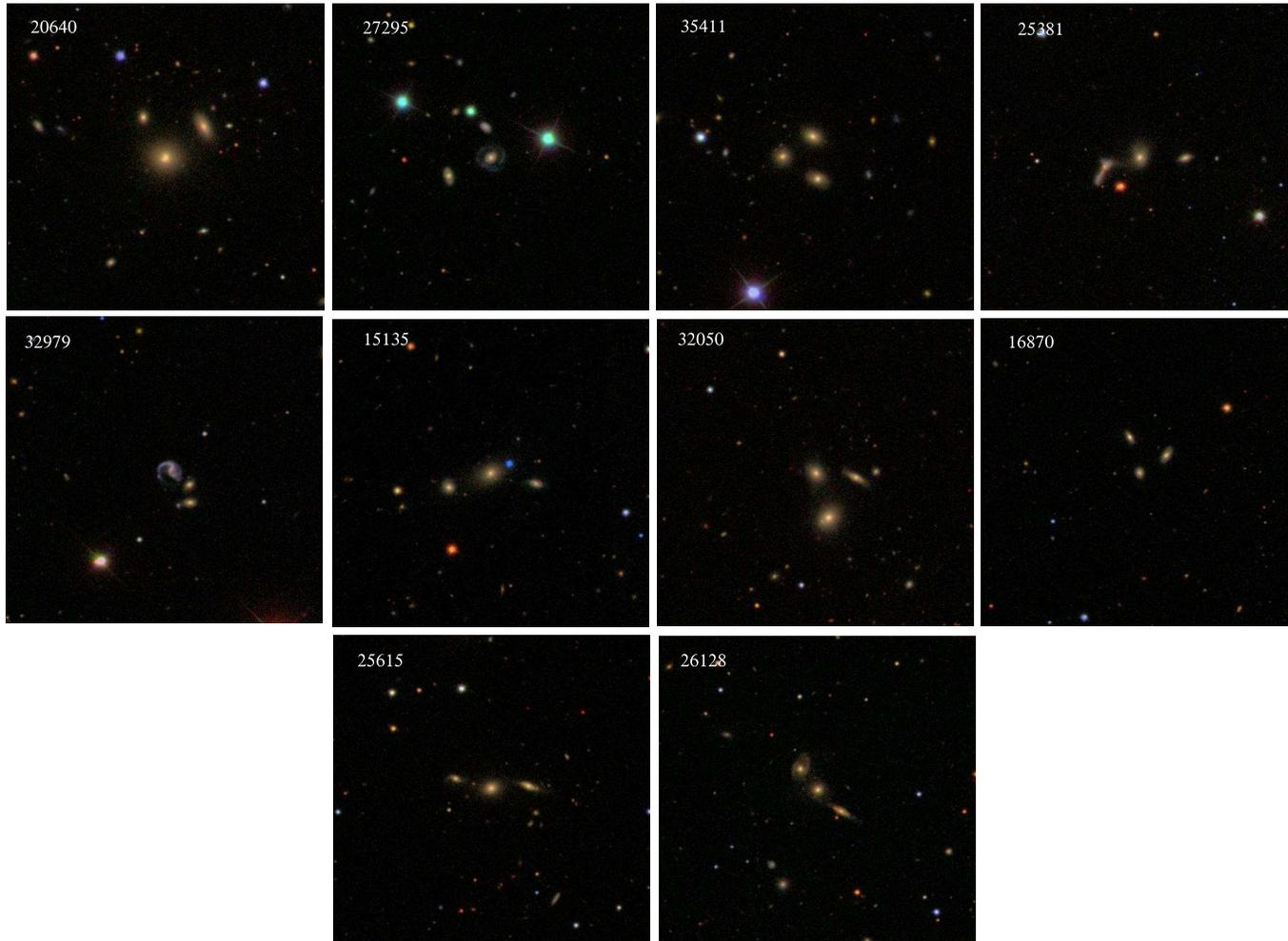
Imágenes correspondientes a la tabla de tripletes espectroscópicos.  
*Fuente:* <http://cas.sdss.org/dr7/en>.



## Tripletes espectro-fotométricos

idg	idgx	RA (J2000)	DEC (J2000)	z
20640	1	08:29:25.69	+39:11:21.6	0.0998
20640	2	08:29:22.38	+39:11:15.5	0.0929
20640	3	08:29:24.46	+39:10:55.0	0.0817
27295	1	08:43:45.71	+37:14:01.8	0.1130
27295	2	08:43:47.68	+37:13:29.4	0.0893
27295	3	08:43:45.42	+37:13:41.5	0.1140
35411	1	11:30:07.69	+44:03:08.4	0.0899
35411	2	11:30:05.62	+44:02:53.7	0.1017
35411	3	11:30:05.90	+44:03:21.7	0.0994
25381	1	12:23:05.36	+07:32:29.0	0.0850
25381	2	12:23:08.77	+07:32:24.3	0.0850
25381	3	12:23:07.31	+07:32:29.4	0.0836
32979	1	12:36:14.95	+05:40:02.8	0.0940
32979	2	12:36:14.92	+05:39:51.0	0.1019
32979	3	12:36:15.72	+05:40:13.2	0.0950
15135	1	12:46:13.87	+05:02:25.6	0.0750
15135	2	12:46:17.60	+05:02:23.2	0.0740
15135	3	12:46:15.81	+05:02:32.4	0.0933
32050	1	13:13:41.69	+57:16:09.8	0.0770
32050	2	13:13:38.54	+57:16:07.0	0.1030
32050	3	13:13:40.70	+57:15:40.4	0.0883
16870	1	13:57:53.32	+14:23:24.5	0.0990
16870	2	13:57:52.14	+14:23:36.0	0.0973
16870	3	13:57:53.76	+14:23:48.0	0.1057
25615	1	15:16:27.84	+18:55:04.2	0.1024
25615	2	15:16:24.55	+18:54:59.3	0.1048
25615	3	15:16:26.23	+18:54:57.8	0.0962
26128	1	15:16:46.08	+07:10:47.2	0.1049
26128	2	15:16:44.33	+07:10:19.2	0.1221
26128	3	15:16:45.33	+07:10:33.3	0.1110





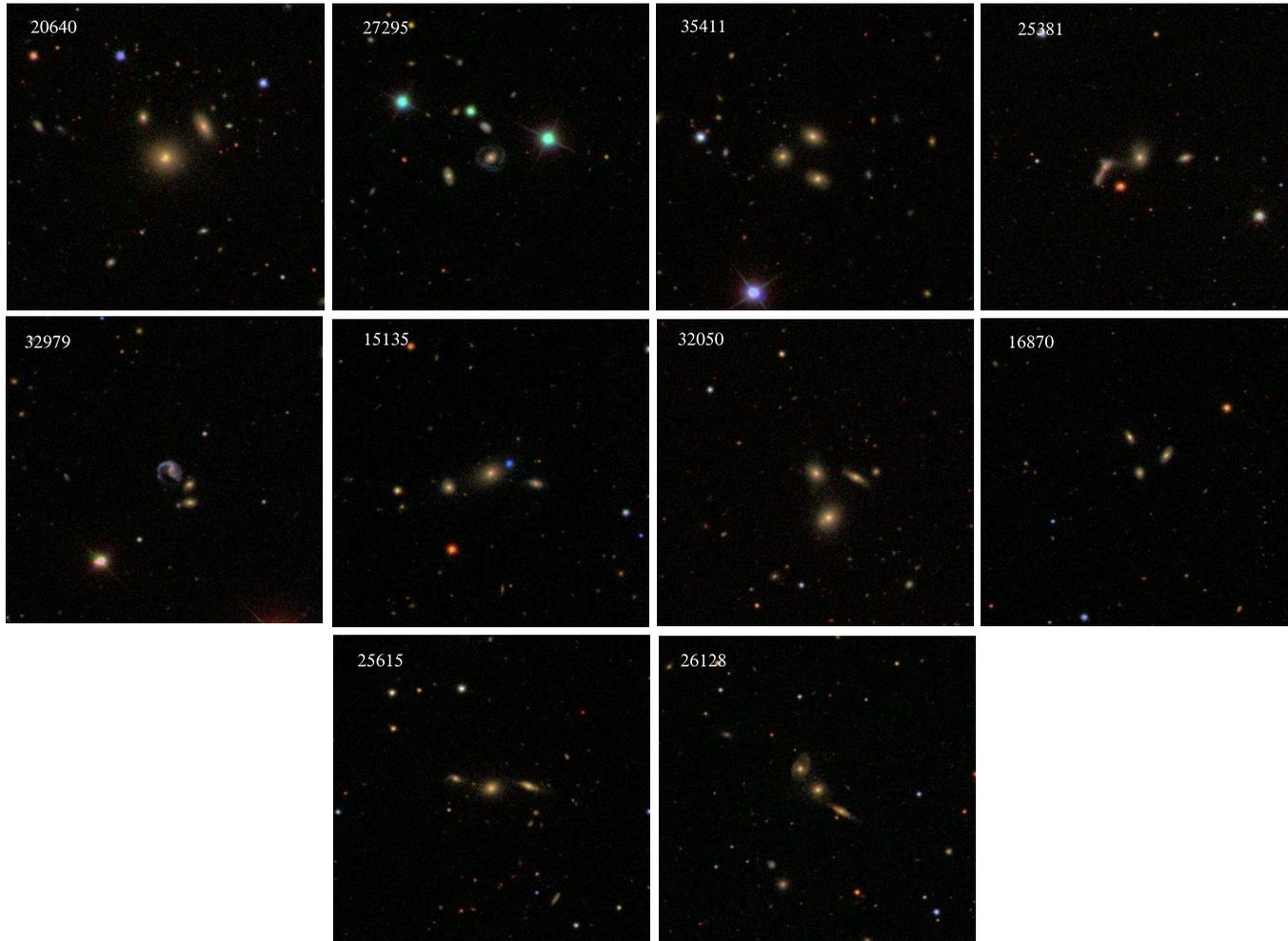
Imágenes correspondientes a la tabla de tripletes espectro-fotométricos.  
*Fuente:* <http://cas.sdss.org/dr7/en>.



## Tripletes fotométricos

idg	idgx	RA (J2000)	DEC (J2000)	z
1254114	1	07:38:19.47	+38:54:39.0	0.1406
1254114	2	07:38:19.85	+38:54:12.9	0.1477
1254114	3	07:38:18.01	+38:54:18.5	0.1495
1676912	1	07:58:17.09	+22:04:49.0	0.1947
1676912	2	07:58:15.68	+22:04:11.1	0.1697
1676912	3	07:58:16.86	+22:04:33.4	0.1727
1315906	1	11:40:51.55	-00:47:21.9	0.2681
1315906	2	11:40:51.73	-00:47:33.1	0.2338
1315906	3	11:40:52.19	-00:47:28.1	0.2519
570075	1	11:56:08.32	+51:44:54.4	0.1363
570075	2	11:56:08.46	+51:44:51.9	0.1605
570075	3	11:56:07.55	+51:45:21.1	0.1415
1532797	1	12:24:45.62	+59:41:50.2	0.4066
1532797	2	12:24:44.21	+59:41:58.1	0.4202
1532797	3	13:36:32.90	+25:13:05.2	0.1460
731274	1	13:11:42.86	+38:52:32.5	0.1585
731274	2	13:11:41.71	+38:52:58.0	0.1535
731274	3	13:11:42.99	+38:53:11.5	0.1519
809317	1	13:50:28.06	+52:10:17.4	0.1379
809317	2	13:50:28.06	+52:10:17.4	0.1429
809317	3	13:50:29.67	+52:10:10.3	0.1516
940305	1	13:54:23.92	+38:53:34.0	0.3513
940305	2	13:54:23.59	+38:53:24.8	0.3449
940305	3	13:54:23.80	+38:53:29.7	0.3326
1464464	1	15:22:37.34	+47:27:34.8	0.1399
1464464	2	15:22:39.99	+47:27:21.6	0.1249
1464464	3	15:22:37.66	+47:27:16.0	0.1262
1156222	1	15:50:39.71	+43:37:49.3	0.1794
1156222	2	15:50:38.89	+43:37:41.2	0.1697
1156222	3	15:50:37.82	+43:37:35.4	0.1609





Imágenes correspondientes a la tabla de tripletes fotométricos.  
*Fuente:* <http://cas.sdss.org/dr7/en>.



---

# Índice de Figuras

---

1.1. Imágenes del cúmulo de Coma en longitud de onda visible obtenida desde el SDSS (izquierda), en rayos X obtenida por el satélite ROSAT (centro) y en longitud de onda de radio milimétrica obtenida por el satélite Planck con contornos de emisión en rayos X de ROSAT superpuestos (derecha). <i>Fuente:</i> NASA/SDSS (Izquierda); ESA/ROSAT (centro); ESA/Consortio LFI y HFI, observatorio Planck (derecha). . . . .	12
1.2. Imágenes de un grupo difuso (izquierda), un grupo compacto (centro) y un grupo fósil de galaxias (derecha), obtenidas a partir del SDSS. <i>Fuente:</i> <a href="http://cas.sdss.org/astrodr7">http://cas.sdss.org/astrodr7</a> . . . . .	15
1.3. Imágenes de un triplete compacto (izquierda) y uno extenso (derecha) del catálogo de Karachentseva et al. (1979) y Trofimov & Chernin (1995), respectivamente. <i>Fuente:</i> <a href="http://cas.sdss.org/astrodr7">http://cas.sdss.org/astrodr7</a> . . . . .	17
1.4. Imágenes de un par en interacción que muestra colas tidales entre las galaxias (izquierda) y una fusión entre dos galaxias de masas similares (derecha), seleccionados desde el catálogo de Lambas et al. (2012). <i>Fuente:</i> <a href="http://cas.sdss.org/astrodr7">http://cas.sdss.org/astrodr7</a> . . . . .	19
2.1. Distribución en coordenadas ecuatoriales celestes de los objetos pertenecientes a los proyectos Legacy (izquierda) y SEGUE (derecha) del SDSS-DR7. En rojo se muestran los campos fotométricos (paneles superiores), y en verde los espectroscópicos (paneles inferiores). <i>Fuente:</i> <a href="http://www.sdss.org/dr7/">http://www.sdss.org/dr7/</a> . . . . .	27

- 
- 2.2. Diagrama del esquema del SDSS-DR7. Desde este gráfico pueden apreciarse las diferentes tablas del SDSS-DR7 y la organización y relación entre la información disponible. *Fuente:* <http://cas.sdss.org/astrodr7/> 28
- 3.1. Tiempo de cómputo de la distancia de luminosidad para una muestra de  $\sim 100000$  galaxias, en función del número de procesadores (N), empleando dos procesadores distintos: AMD Athlon(tm) II X2 240e Processor 2 3GiB ram (PI) y AMD Phenom(tm) II X4 955 Processor 4 3GiB ram (PII). Si el valor N es igual a 0, entonces los tiempos que se muestran son aquellos obtenidos de correr el programa en serie. . . . 41
- 3.2. Distribución de magnitud absoluta en la banda  $r$  como función del redshift para las galaxias de la MGS con  $r < 17.77$  (gris oscuro) y para una muestra aleatoria del un 0.01 % de las galaxias con información de redshift fotométrico con  $r < 21.5$  (gris claro). Las líneas verticales de trazos muestran el redshift límite para el cual una muestra de galaxias con  $M_r < -20.5$  es completa tanto para datos espectroscópicos como para datos fotométricos. La línea horizontal de trazos muestra la magnitud límite ( $M_r = -20.5$ ) para la cual la muestra total es completa. . . . . 43
- 3.3. Distribución de redshift para la muestra de cúmulos derivada desde el catálogo de Zapata et al. (2009) (línea discontinua) y para el catálogo de cúmulos GMBCG (línea continua). . . . . 46
- 3.4. Distribución de redshift (panel superior) y magnitud absoluta en la banda  $r$  (panel intermedio) de las galaxias en tripletes aislados a bajo redshift. El panel inferior muestra la distribución de la distancia al cúmulo de galaxias más cercanos de estos sistemas, la línea vertical de trazos en esta figura se corresponde con el radio de Abell de cúmulos masivos ( $1.5 h^{-1}\text{Mpc}$ ). . . . . 48
- 3.5. Ejemplos de tripletes espectroscópicos, las galaxias miembro del triplete están marcadas con un triángulo. Las galaxias extra que se observan en estas imágenes poseen redshifts discordantes o magnitudes mayores que  $M_r = -20.5$  *Fuente:* <http://cas.sdss.org/dr7/en/> . . . . 50

- 
- 3.6. Imágenes de tripletes espectro-fotométricos con una galaxia miembro con espectroscopía (derecha) y dos galaxias miembro con espectroscopía (izquierda). Las cruces muestran las galaxias del triplete y los cuadrados rojos los objetos que poseen información espectrocópica. *Fuente:* <http://cas.sdss.org/dr7/en>. . . . . 51
- 3.7. Distribución de redshift (panel superior) y magnitud absoluta en la banda  $r$  (panel intermedio) de las galaxias en tripletes aislados a redshift intermedio. El panel inferior muestra la distribución de la distancia al cúmulo de galaxias más cercanos de estos sistemas, la línea vertical de trazos en esta figura se corresponde con el radio de Abell de cúmulos masivos ( $1.5 h^{-1}\text{Mpc}$ ). . . . . 52
- 3.8. Ejemplos de tripletes fotométricos, las galaxias miembro del triplete están marcadas con un triángulo. Las galaxias extra que se observan en estas imágenes poseen redshifts discordantes o magnitudes mayores que  $M_r = -20.5$  *Fuente:* <http://cas.sdss.org/dr7/en/> . . . . . 53
- 3.9. Distribución de redshift (panel superior) y densidad numérica de tripletes por unidad de volumen comóvil en función del redshift (panel inferior) para la muestra total de tripletes. Las barras de error fueron calculadas utilizando técnicas bootstrap (Efron, B. , 1979). . . . . 54
- 4.1. *Panel Superior:* Distribución espacial de ascensión recta y declinación para el catálogo sintético (izquierda) y para la MGS del SDSS-DR7 (derecha). *Panel Inferior:* Distribución en gran escala de las galaxias en el espacio de redshift para el catálogo sintético (izquierda) y para la MGS del SDSS-DR7 (derecha). . . . . 58
- 4.2. Distribución de redshif (panel superior), magnitud aparente (panel intermedio) y magnitud absoluta (panel inferior) en la banda  $r$  para muestra MGS del SDSS-DR7 y para el catálogo sintético (Mock). . . 59
- 4.3. Distribución de la masa del halo de materia oscura en unidades de masas solares para los tripletes aislados y sin aislar identificados empleando distancias reales en el Mock. . . . . 60

- 
- 4.4. Tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) como función del redshift para tripletes sin aislar. Se ha distinguido entre sistemas inmersos en halos de materia oscura con masas mayores y menores que  $10^{14}M_{\odot}$ . . . . . 62
- 4.5. Tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) como función del redshift para tripletes aislados. Se ha distinguido entre sistemas inmersos en halos de materia oscura con masas mayores y menores que  $3 \times 10^{13}M_{\odot}$ . . . . . 64
- 4.6. Panel Superior: Relación entre el redshift espectroscópico ( $z_s$ ) y el redshift fotométrico ( $z_p$ ) para la muestra MGS del SDSS-DR7. Panel Inferior: Distribución normalizada de la diferencia  $z_p - z_s$ . La línea continua representa una gaussiana centrada en cero y con dispersión igual  $\sigma_{phot} = 0.0227$ . . . . . 65
- 4.7. Tasa de completitud (a), pureza (b) y contaminación por sistemas espurios (c) como función del redshift para tripletes identificados modelando el error del redshift fotométrico. Izquierda: Sistemas sin aislar. Derecha: Tripletes aislados. . . . . 67
- 4.8. Distribución de redshift de la muestra de tripletes espectroscópicos (spec) y la muestra de estos sistemas incluyendo los tripletes espectrofotométricos (spec+spec\_fot). . . . . 70
- 4.9. Distribución de redshift de la muestra de tripletes espectroscópicos y de la muestra tripletes del catálogo “Isolated Triplets of galaxies” de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988). La línea de trazos en esta figura representa los sistemas de esta última muestra que poseen  $\Delta V_{rms} < 1000\text{km s}^{-1}$  e indicador de aislamiento (+++). . . . . 71
- 5.1. Esquema del mapa-AA donde se muestran las distintas áreas que corresponden a diferentes posibles configuraciones de tripletes: (L) Lagrangiana, (H) Jerárquica, (A) Lineales e (M) intermedia. . . . . 74
- 5.2. Imagen ilustrativa de una proyección estereográfica oblicua de un triángulo. . . . . 75

---

5.3. Ejemplos de las transformaciones realizadas sobre las coordenadas de las galaxias miembro de tripletes para poder representar sus configuraciones en el mapa-AA. . . . .	77
5.4. Mapa-AA para los tripletes aislados obtenidos a partir del catálogo sintético descrito en el capítulo 4. <i>Izquierda:</i> Configuraciones 3D reales. <i>Derecha:</i> Configuraciones 2D proyectadas. . . . .	79
5.5. Mapa-AA de los tripletes aislados 3D (izquierda) y 2D (derecha) obtenidos a partir del catálogo sintético. Las cruces muestran los sistemas que poseen distancias mínimas entre galaxias menores al límite de resolución de la simulación. . . . .	81
5.6. Distribución de masa del halo de materia oscura en el que se encuentran inmersos los tripletes 3D obtenidos desde el catálogo sintético. Se ha diferenciado entre las diferentes configuraciones de los tripletes según la posición en el mapa-AA. . . . .	83
5.7. Mapa-AA para la muestra de tripletes espectroscópicos y para la muestra de tripletes físicos aislados del catálogo de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988) (K-tripletes). . . . .	85
5.8. Valor de la densidad $\alpha$ en función de configuraciones del mapa-AA, para la muestra de tripletes 2D del catálogo sintético (tripletes 2D), para la muestra de tripletes espectroscópicos (tripletes) y para la muestra de tripletes físicos aislados del catálogo de Karachentseva, Karachentsev & Lebedev (1988) (K-tripletes). Las barras de error se corresponden con el error estandar de estas estimas. . . . .	86
5.9. Valores medios de los parámetros dinámicos de los tripletes espectroscópicos en función de las diferentes configuraciones del mapa-AA. . . . .	88

- 
- 6.1. *Izquierda:* valores de la mediana de  $\log M_*/M_\odot$ ,  $\log SFR/M_*$ , índice  $D_n(4000)$  y color ( $M_g - M_r$ ) de las galaxias en la muestra de tripletes espectroscópicos aislados ( $N_{05} = 3$ ) en función de la configuración del sistema. Las barras de error fueron calculadas utilizando técnicas bootstrap.
- Derecha:* Distribución de estos parámetros para las galaxias de los sistemas analizados distinguiendo entre las diferentes configuraciones del mapa-AA (ver referencias en la figura). . . . . 93
- 6.2. Distribuciones normalizadas de redshift ( $z$ , panel superior), magnitud absoluta en la banda  $r$ , ( $M_r$ , panel del medio) y masa en estrellas ( $\log M_*/M_\odot$ , panel inferior) para las muestras de galaxias analizadas en esta sección (ver referencias en la figura). . . . . 98
- 6.3. Valores medios de  $\log SFR/M_*$  (panel superior), índice  $D_n(4000)$  (panel del medio) e índice de color ( $M_g - M_r$ ) (panel inferior), en 5 intervalos de  $\log M_*/M_\odot$ , para las muestras analizadas en esta sección (ver referencias en la figura). Las barras de error han sido calculadas utilizando técnicas bootstrap. . . . . 101
- 6.4. Distribuciones de  $\log SFR/M_*$  (panel superior), índice  $D_n(4000)$  (panel del medio) e índice de color ( $M_g - M_r$ ) (panel inferior) en 5 intervalos de  $\log M_*/M_\odot$ , para las muestras de galaxias analizadas en esta sección (ver referencias en la figura). . . . . 102
- 7.1. Distribución del número de sistemas que verifican las combinaciones (1a) (panel izquierdo superior), (1b) (panel izquierdo medio), (1c) (panel izquierdo inferior), (2a) (panel derecho superior), (2b) (panel derecho medio) y (2c) (panel derecho inferior), para las 1000 muestras aleatorias de tripletes. Las líneas verticales de trazos corresponden a los valores obtenidos para la muestra real de tripletes. . . . . 109
- 7.2. Distribución normalizada de redshift del sistema (panel izquierdo) y masa total en estrellas (panel derecho) para tripletes y grupos compactos. . . . . 112

- 
- 7.3. Tasa de formación estelar específica  $\log SFR/M_*$  (Panel superior), índice de color  $(M_g - M_r)$  (panel del medio) e índice de concentración  $C$  (panel inferior) en función de  $\log \text{Total } M_*/M_\odot$ . Los contornos llenos representan las propiedades de grupos compactos, en negro se marcan los contornos correspondientes al 10, 50 y 90 % de las galaxias en esta muestra. Los puntos representan las propiedades de los tripletes, distinguiendo entre tripletes rojos, tripletes azules y tripletes que no caen en ninguna de estas categorías (ver referencias en la figura). . . . . 113
- 7.4. *Izquierda:* Tasa de formación estelar total  $\log \text{Total } SFR$  (panel superior), color Total  $(M_g - M_r)$  (panel del medio) y compacticidad S (panel inferior), en función de  $\log \text{Total } M_*/M_\odot$ . Los contornos llenos representan las propiedades de grupos compactos, en negro se marcan los contornos correspondientes al 10, 50 y 90 % de las galaxias en esta muestra. Los puntos representan las propiedades de los tripletes, distinguiendo entre tripletes rojos, tripletes azules y tripletes que no caen en ninguna de estas categorías (ver referencias en la figura).  
*Derecha:* Distribuciones normalizadas de  $\log \text{Total } SFR$  (panel superior), color Total  $(M_g - M_r)$  (panel intermedio) y compacticidad S (panel inferior) para tripletes y grupos compactos (ver referencias en la figura). . . . . 115
- 7.5. Distribución de las configuraciones en el mapa-AA de los tripletes espectroscópicos aislados. Se ha distinguido entre tripletes rojos y tripletes azules. . . . . 117



---

# Índice de Tablas

---

2.1. Principales características del SDSS-DR7 . . . . .	26
5.1. Cantidad de tripletes 3D y 2D en cada zona del mapa-AA y porcentajes de tripletes 2D3D para cada configuración. . . . .	79
5.2. Valores de la densidad de tripletes en cada área del mapa-AA del catálogo sintético. . . . .	81
5.3. Valores de la densidad de tripletes en cada área del mapa-AA. . . . .	85
5.4. Valores medios de los parámetros dinámicos estimados en este capítulo.	87
6.1. Nombre y número de galaxias en la muestra de tripletes y en las muestras control. . . . .	97
7.1. Nombre de la combinación, descripción, valor real de sistemas satisfaciendo cada combinación y la probabilidad $P$ que estos valores puedan ser obtenidos a través de un muestreo aleatoria. . . . .	110



---

# Agradecimientos

---

Quiero comenzar agradeciendo a mi Director el Dr. Diego García Lambas por su guía durante estos años y por ser siempre un ejemplo de científico y de persona para mi. A mi co-director el Dr. Laerte Sodré por su aporte a este trabajo. A mi co-directora de beca, la Dra. María Sol Alonso, gracias por acompañarme en este proceso y aconsejarme sobre tantas decisiones científicas y personales.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por subsidiar mi doctorado a través de las becas de posgrado PGI y PGII.

Agradecer también al jurado de esta tesis, los Dres. Carlos Valotto, Hernán Muriel y Georgina Coldwell por su valioso aporte a este trabajo.

A la Dra. Ana Laura O'Mill por su gran colaboración en este trabajo.

A toda la gente linda del IATE por recibirme y tratarme tan bien durante los años que viví en Córdoba y tener siempre las puertas abiertas y una sonrisa cada vez que viajó a trabajar al instituto.

Gracias a mis compañeras de oficina Anita y Gabi por darme esos años de risas y su amistad.

También agradecer a mis amigas y amigos, repartidos en tantos lugares, por acompañarme durante todo este proceso y seguir estando a pesar de las distancias.

A mi familia por el apoyo desinteresado e incondicional a todas mis decisiones.

Y finalmente un gracias grande a Gustavo, mi amigo, compañero y esposo por ser siempre la alegría en mi vida.



---

## Referencias Bibliográficas

---

- Abell, G. O. 1958, ApJS, 3, 211
- Adami, C., Ulmer, M. P., Romer, A. K., Nichol, R. C., Holden, B. P., Pildis, R. A. 2000, ApJS, 131, 391
- Abazajian, K. N., et al. 2009, ApJS, 182, 543
- Ascaso, B., Wittman, D., & Benítez, N. 2012, MNRAS, 420, 1167
- Aceves, H. 2001, MNRAS, 326, 1412
- Agekyan, T. A., & Anosova, Z. P. 1968, SvA, 11, 1006
- Alonso, M. S., Tissera, P. B., Coldwell, G., & Lambas, D. G. 2004, MNRAS, 352, 1081
- Alonso, M. S., Lambas, D. G., Tissera, P., & Coldwell, G. 2006, MNRAS, 367, 1029
- Alonso, S., Mesa, V., Padilla, N., & Lambas, D. G. 2012, A&A, 539, A46
- Annis, J., Kent, S., Castander, F., et al. 1999, Bulletin of the American Astronomical Society, 31, 1391
- Baldry I. K., Glazebrook K., Brinkmann J., Ivezić Z., Lupton R. H., Nichol R. C., Szalay A. S. 2004, ApJ, 600, 681
- Balogh M., Morris S. L., Yee H. K. C., Carlberg R. G., Ellingson E. 1999, ApJ, 527, 54

- 
- Balogh M., Eke V., Miller C., Lewis I., Bower R., Couch W., Nichol R., Bland-Hawthorn J. 2004, MNRAS, 348, 1355
- Barnes, J. E. 1992, ApJ, 393, 484
- Barnes, J. & Hernquist L. 1992, ARA& A, 30, 705
- Barnes, J. & Hernquist L. 1996, ApJ, 471, 115
- Baum, W. A., Hiltner, W. A., Johnson, H. L., & Sandage, A. R. 1959, ApJ, 130, 749
- Benítez, N. 2000, ApJ, 536, 571
- Blanton, M. R., Brinkmann, J., Csabai, I., et al. 2003, AJ, 125, 2348
- Blanton, M. R., & Roweis, S. 2007, AJ, 133, 734
- Brasseur, C. M., McConnachie, A. W., Ellison, S. L., & Patton, D. R. 2009, MNRAS, 392, 1141
- Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., et al. 2004, MNRAS, 351, 1151
- Bode P. W., Cohn H. N. & Lugger P. M. 1993, ApJ, 416, 17
- Chernin, A. D., & Mikkola, S. 1991, MNRAS, 253, 153
- Chernin, A. D., Ivanov, A. V., Trofimof, A. V., & Mikkola, S. 1994, A&A, 281, 685
- Chernin, A. D., Dolgachev, V. P., & Domozhilova, L. M. 2000, MNRAS, 319, 851
- Coenda, V., Muriel, H., & Martínez, H. J. 2012, A&A, 543, A119
- Collister, A. A., & Lahav, O. 2004, PASP, 116, 345
- Croton, D. J., et al. 2006, MNRAS, 365, 11
- Dariush, A., Khosroshahi, H. G., Ponman, T. J., et al. 2007, MNRAS, 382, 433
- Diaferio, A., Geller, M. J., & Ramella, M. 1994, AJ, 107, 868
- Dressler A. 1980, ApJ, 236, 351

- 
- Efron, B. 1979, *Annals of Statistics* 7, 1-26
- Eisenstein, D. J., Annis, J., Gunn, J. E., et al. 2001, *AJ*, 122, 2267
- Eke, V. R., et al. 2004, *MNRAS*, 355, 769
- Eke, V. R., Baugh, C. M., Cole, S., et al. 2005, *MNRAS*, 362, 1233
- Elyiv, A., Melnyk, O., & Vavilova, I. 2009, *MNRAS*, 394, 1409
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., & Schneider, D. P. 1996, *AJ*, 111, 1748
- Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1983, *ApJS*, 52, 61
- Gladders, M. D., & Yee, H. K. C. 2000, *AJ*, 120, 2148
- Gómez, P. L., Nichol, R. C., Miller, C. J., et al. 2003, *ApJ*, 584, 210
- González, R. E., & Padilla, N. D. 2009, *MNRAS*, 397, 1498
- Governato F., Tozzi P. & Cavaliere A. 1996, *ApJ*, 458, 18
- Gunn, J. E., et al. 1998, *AJ*, 116, 3040
- Gunn, J. E., & Gott, J. R. I. 1972, *ApJ*, 176, 1
- Goto, T., et al. 2002, *AJ*, 123, 1807
- Hao, J., Koester, B. P., McKay, T. A., et al. 2009, *ApJ*, 702, 745
- Hao, J., McKay, T. A., Koester, B. P., et al. 2010, *ApJS*, 191, 254
- Hernández-Toledo, H. M., Méndez-Hernández, H., Aceves, H., & Olguín, L. 2011, *AJ*, 141, 74
- , Hearn, D. W. , Vijay, J. 1982, “Efficient Algorithms for the (weighted) Minimum Circle Problem”, *Operations Research*, Vol. 30, No. 4, 777
- Hickson, P. 1982, *ApJ*, 255, 382
- Hickson P., Kindl E., Huchra J. P. 1988, *ApJ*, 331, 64

- 
- Hickson P., Mendes de Oliveira C., Huchra J. P., Palumbo G. G. C. 1992, ApJ, 399, 353
- Hogg, D. W., Blanton, M., & SDSS Collaboration 2001, Bulletin of the American Astronomical Society, 34, 570
- Hook, I. M., Jørgensen, I., Allington-Smith, J. R., et al. 2004, PASP, 116, 425
- Huchra, J. P. & Geller, M. J. 1982, ApJ, 257, 423
- Jones, L. R., Ponman, T. J., Horton, A., et al. 2003, MNRAS, 343, 627
- Karachentsev, I. D. 1972, Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii, 7, 1
- Karachentseva, V. E., Karachentsev, I. D., & Shcherbanovskii, A. L. 1979, Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii, 11, 3
- Karachentseva, V. E., Karachentsev, I. D., & Lebedev, V. S. 1988, Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii, 26, 42
- Karachentseva, V. E., & Karachentsev, I. D. 2000, IAU Colloq. 174: Small Galaxy Groups, 209, 11
- Kauffmann G. 2002, MNRAS, 264, 201
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., et al. 2003, MNRAS, 341, 33
- Kepner, J., Fan, X., Bahcall, N., Gunn, J., Lupton, R., & Xu, G. 1999, ApJ, 517, 78
- Kennicutt R. 1998, ARA &A, 36, 189
- Kim, R., et al. 2002, AJ123, 20
- Kiseleva, L. & Orlov, V. 1993, MNRAS, 260, 475
- Kiseleva, L. 2000, IAU Colloq. 174: Small Galaxy Groups, 209, 388
- Koester, B. P, et al. 2007a, ApJ, 660, 23

- 
- Koester, B. P., McKay, T. A., Annis, J., et al. 2007, *ApJ*, 660, 221
- Lee, B. C., Allam, S. S., Tucker, D. L., et al. 2004, *AJ*, 127, 1811
- Lambas, D. G., Tissera, P. B., Alonso, M. S., & Coldwell, G. 2003, *MNRAS*, 346, 1189
- Lambas, D. G., Alonso, S., Mesa, V., & O'Mill, A. L. 2012, *A&A*, 539, A45
- Larson R. B., Tinsley B. M., Caldwell C. N., 1980, *ApJ*, 273, 692
- Liu, H. B., Hsieh, B. C., Ho, P. T. P., Lin, L., & Yan, R. 2008, *ApJ*, 681, 1046
- Mamon, G. A. 1992, *ApJL*, 401, L3
- Maia, M. A. G., da Costa, L. N., & Latham, D. W. 1989, *ApJS*, 69, 809
- Marinoni, C., Davis, M., Newman, J. A., & Coil, A. L. 2002, *ApJ*, 580, 122
- Mateus, A. & Sodr e, L. 2004, *MNRAS*, 349, 1251
- McConnachie, A. W., Ellison, S. L., & Patton, D. R. 2008, *MNRAS*, 387, 1281
- McConnachie, A. W., Patton, D. R., Ellison, S. L., & Simard, L. 2009, *MNRAS*, 395, 255
- Mendes de Oliveira, C. L., & Carrasco, E. R. 2007, *ApJL*, 670, L93
- Mesa, V., Duplancic, F., Alonso, S., Coldwell, G., & Lambas, D. G. 2014, *MNRAS*, DOI:10.1093/mnras/stt2317
- Mihos J.C. & Hernquist L. 1996, *ApJ*464, 641
- Miller, C. J., Nichol, R. C., Reichart, D., et al. 2005, *AJ*, 130, 968
- Mulchaey, J. S., & Zabludoff, A. I. 1999, *ApJ*, 514, 133
- Mulchaey, J. S., Davis, D. S., Mushotzky, R. F., & Burstein, D. 2003, *ApJS*, 145, 39
- , A. J. 1974, *ApJ*, 194, 1
- Oke, J. B., & Sandage, A. 1968, *ApJ*, 154, 21

- 
- Oke, J. B., & Gunn, J. E. 1983, *ApJ*, 266, 713
- O'Mill A., Padilla N. D., Lambas D. G. 2008, *MNRAS*, 389, 1763
- O'Mill, A. L., Duplancic, F., García Lambas, D., & Sodré, L., Jr. 2011, *MNRAS*, 413, 1395
- O'Mill, A. L., 2011, Tesis Doctoral: "Estudios estadísticos en entornos de Galaxias", [http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie\\_d/DAst64.pdf](http://www2.famaf.unc.edu.ar/publicaciones/documents/serie_d/DAst64.pdf)
- O'Mill, A. L., Duplancic, F., García Lambas, D., Valotto, C., & Sodré, L. 2012, *MNRAS*, 421, 1897
- Padilla, N., Lambas, D. G., & González, R. 2010, *MNRAS*, 409, 936
- Patton, D. R., Carlberg, R. G., Marzke, R. O., et al. 2000, *ApJ*, 536, 153
- Palumbo G., Saracco P., Hickson P., Mendes de Oliveira C. 1995, *ApJ*, 109, 1476
- Petrosian, V. 1976, *ApJL*, 209, L1
- Pier, J. R., Munn, J. A., Hindsley, R. B., Hennessy, G. S., Kent, S. M., Lupton, R. H., & Ivezi ,  . 2003, *AJ*, 125, 1559
- Ponman, T. J., & Bertram, D. 1993, *Nature*, 363, 51
- Ponman, T. J., Allan, D. J., Jones, L. R., et al. 1994, *Nature*, 369, 462
- Postman, M., Lubin, L. M., Gunn, J. E., et al. 1996, *AJ*, 111, 615
- Postman, M., Lauer, T. R., Oegerle, W. Donahue, M. 2002, *ApJ*, 579, 93
- Ramella, M., Boschini, W., Fadda, D., & Nonino, M. 2001, *A&A*, 368, 776
- Richards, G. T., Fan, X., Newberg, H. J., et al. 2002, *AJ*, 123, 2945
- Salim et al. 2007, *ApJS*, 173, 267S
- Sarazin, C. L. 1986, *Reviews of Modern Physics*, 58, 1
- Shectman, S. A. 1985, *ApJS*, 57, 77

- 
- Smith, J. A., Tucker, D. L., Allam, S. S., & Jorgensen, A. M. 2002, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 34, 1272
- Soares, D. S. L. 2007, *AJ*, 134, 71
- Soares-Santos, M, et al. 2011, *ApJ*, 727, 45
- Söchting, I. K., Huber, M. E., Clowes, R. G., & Howell, S. B. 2006, *MNRAS*, 369, 1334
- Spergel, D. N., Verde, L., Peiris, H. V., et al. 2003, *ApJS*, 148, 175
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al. 2005, *Nature*, 435, 629
- Strateva, I., et al. 2001, *AJ*, 122, 1861
- Strauss, M. A., et al. 2002, *AJ*, 124, 1810
- Toomre, Alar & Toomre, Juri 1972, *ApJ*, 178, 623T
- Trofimov, A. V., & Chernin, A. D. 1995, *Astronomy Reports*, 39, 308
- Tzanavaris, P., Hornschemeier, A. E., Gallagher, S. C., et al. 2010, *ApJ*, 716, 556
- Väisänen, P., Mattila, S., Kniazev, A., et al. 2008, *MNRAS*, 384, 886
- Verdes-Montenegro, L., Yun, M. S., Williams, B. A., et al. 2001, *A&A*, 377, 812
- Wolf, M., 1906, *Astronomische Nachrichten*, 170, 211
- Yee, H. K. C., & Ellingson, E. 1995, *ApJ*, 445, 37
- Yang, X., Mo, H. J., van den Bosch, F. C., Jing, Y. P. 2005, *MNRAS*, 356, 1293
- York, D. G., et al. 2000, *AJ*, 120, 1579
- Zandivarez, A., Díaz-Giménez, E., Mendes de Oliveira, C., et al. 2013, arXiv:1311.0900
- Zapata T., Perez J., Padilla N., Tissera P. 2009, *MNRAS*, 394, 2229
- Zheng, J.-Q., Valtonen, M. J., & Chernin, A. D. 1993, *AJ*, 105, 2047

Zwicky, F. 1937, ApJ, 86, 217

Zwicky, F., Herzog, E., & Wild, P. 1968, Pasadena: California Institute of Technology (CIT), 1961-1968