



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis presentada ante la
Universidad Nacional de La Plata
para optar por el título de Licenciado en Astronomía

**Estudio fotométrico de candidatas
a galaxias enanas ultra-compactas
en el cúmulo de Antlia**

Juan Pablo Caso

Directora: Dra. Lilia P. Bassino

Co-directora: Dra. Analía V. Smith Castelli

2010

Directora:

Dra. Lilia P. Bassino (*Universidad Nacional de La Plata*)

Co-directora:

Dra. Analía V. Smith Castelli (*Universidad Nacional de La Plata*)

Jurado:

Dra. Lilia P. Bassino (*Universidad Nacional de La Plata*)

Dr. Sergio A. Cellone (*Universidad Nacional de La Plata*)

Dr. Carlos Feinstein (*Universidad Nacional de La Plata*)

Presentada para su evaluación: 4 de Marzo de 2010

Aprobada: 26 de Marzo de 2010

Versión Final: 5 de Abril de 2010

Resumen

El primer trabajo observacional referido a la existencia de las galaxias enanas ultracompactas (UCDs) data de apenas una década atrás. A partir de ese momento se han confirmado objetos de este tipo en cúmulos de galaxias como el de Virgo y Fornax, así como también en algunas galaxias ubicadas en ambientes de menor densidad. A estos objetos se suman otros tantos candidatos observados en trabajos referidos a varios cúmulos de galaxias cercanos, cuya pertenencia a los mismos aún no ha sido claramente establecida. La información referida a ellos es escasa, y debido a su exiguo número y la falta de uniformidad en las propiedades de muchos de estos, las teorías que buscan explicar su origen son variadas.

En el trabajo realizado en la presente tesis identificamos candidatos a UCDs cuya ubicación proyectada se encuentra en las regiones centrales del cúmulo de galaxias de Antlia. Este trabajo es la primer búsqueda de objetos de este tipo en dicho cúmulo, y uno de los primeros trabajos sobre UCDs realizados en el sistema fotométrico de Washington, el cual es más eficiente que otros sistemas tradicionales para diferenciar poblaciones según su metalicidad.

Debido a que no disponemos de observaciones espectroscópicas, nos limitamos a identificar objetos que poseen características fotométricas similares a las observadas en UCDs confirmadas. Posteriormente procedemos a comparar la distribuciones (espaciales, radiales ...etc) de estos con las galaxias enanas elípticas nucleadas (dE,N) catalogadas en la literatura para esta región, y especialmente con los candidatos a cúmulos globulares (CGs). Tanto CGs como galaxias dE,N han sido escogidos por estar relacionados con las UCDs en las teorías más plausibles. Los primeros son considerados por algunos autores parientes menos masivos de las UCDs; las segundas, han sido señaladas como posibles progenitores. En este marco, las características del cúmulo de Antlia, con dos galaxias dominantes, lo hacen un ambiente ideal para contrastar ambas hipótesis con las observaciones.

Algunos resultados aquí expuestos sugieren que no todos los objetos sindicados como galaxias UCDs tendrían un mismo origen.

Agradecimientos

A Lilia y Analía,
por la paciencia y dedicación.

A Francisco,
por los numerosos consejos en problemas estadísticos.

A mi familia y amigos,
por haber hecho este camino más placentero.

A mis padres,
por haber sido mi apoyo, y el motor de todos mis proyectos.

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	III
1. Introducción	1
1.1. Galaxias Enanas Ultracompactas	1
1.1.1. Características generales y contexto histórico	1
1.1.2. Tamaños típicos	2
1.1.3. Metalicidades y estimaciones de edades	4
1.1.4. Relación luminosidad - dispersión central de velocidades	6
1.1.5. Estimaciones de masas y cocientes M/L	12
1.1.6. Posibles escenarios de formación para las UCDS	13
1.2. El cúmulo de Antlia	15
2. Datos y Reducción	17
2.1. Observaciones y reducción básica	17
2.2. Reducción de las imágenes	18
2.2.1. Selección preliminar de objetos puntuales y fotometría	18
2.2.2. Corrección de apertura y selección final de objetos puntuales	20
2.2.3. Calibración al sistema estándar y corrección por enrojecimiento	22
2.3. Construcción de las muestras	23
2.3.1. Selección por color y magnitud	23
2.3.2. Campo de comparación	24
2.3.3. Extensión radial proyectada	25
3. Distribución espacial proyectada	29
4. Colores y magnitudes	39
4.1. Distribución de color	39

4.2. Función de luminosidad	44
5. Perfiles radiales y dependencia angular	53
5.1. Distribución radial	53
5.2. Nuevo análisis para detección de CGs intracúmulo	60
5.3. Distribución acimutal	62
6. Conclusiones	67

Índice de figuras

1.1.	Magnitud absoluta en el visual contra dispersión central de velocidades para diversos objetos obtenidos de la literatura. . .	7
2.1.	Ubicación de los dos campos obtenidos con MOSAIC sobre una combinación de imágenes del Palomar Observatory Sky Survey en el filtro rojo.	18
2.2.	Diagrama color-magnitud de los objetos puntuales en el campo central.	25
2.3.	Diagrama color-magnitud de los objetos puntuales en el campo Este.	25
2.4.	Ubicación del campo de comparación sobre una combinación de imágenes del POSS en el filtro rojo.	26
2.5.	Distribuciones radiales de candidatos a CGs para NGC 3258 y NGC 3268.	27
3.1.	Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo central de MOSAIC.	30
3.2.	Porcentaje de candidatas a UCDs más brillantes que la magnitud considerada, situados en los alrededores de las dos galaxias dominantes.	32
3.3.	Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo central de Antlia con $19.65 < T_1 < 21.1$. . .	32
3.4.	Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo central de MOSAIC con $18.6 < T_1 < 19.65$. .	33
3.5.	Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo central de MOSAIC con $18.6 < T_1 < 19.65$, y galaxias dE,N.	37
4.1.	Distribución de color de los sistemas de candidatos a CGs en ambas galaxias.	40
4.2.	Distribución de color de las candidatas a UCDs brillantes cercanas a NGC 3258.	41

4.3.	Distribución de color de las candidatas a UCDs brillantes cercanas a NGC 3268.	41
4.4.	Distribución de color de las candidatas a UCDs <i>débiles</i> y candidatos a CGs cercanos a NGC 3258.	42
4.5.	Distribución de color de las candidatas a UCDs <i>débiles</i> y candidatos a CGs cercanos a NGC 3268.	43
4.6.	Porcentaje de candidatos azules en función de la magnitud.	44
4.7.	Función de luminosidad de candidatas a UCDs.	45
4.8.	Función de luminosidad de los candidatos a CGs próximos a NGC 3258.	47
4.9.	Función de luminosidad de los candidatos a CGs próximos a NGC 3268.	48
4.10.	Función de luminosidad de candidatos a CGs y candidatas a UCDs con $T_1 > 19.65$, cercanos a NGC 3258.	48
4.11.	Función de luminosidad de candidatos a CGs y candidatas a UCDs con $T_1 > 19.65$, cercanos a NGC 3268.	49
4.12.	Magnitud promedio de los candidatos a CGs con $T_1 < 23.3$ en función del radio galactocéntrico.	50
4.13.	Magnitud promedio de las candidatas a UCDs débiles en función de la distancia proyectada a la galaxia más cercana.	51
5.1.	Distribución radial proyectada de candidatos a CGs cercanos a NGC 3258.	54
5.2.	Distribución radial proyectada de candidatos a CGs cercanos a NGC 3268.	55
5.3.	Distribución radial de candidatas a UCDs cercanas a NGC 3258.	56
5.4.	Distribución radial de candidatas a UCDs cercanas a NGC 3268.	57
5.5.	Distribución radial de candidatas a UCDs <i>rojas</i> cercanas a NGC 3268.	58
5.6.	Distribución radial de candidatos a CGs azules cercanos a NGC 3268.	59
5.7.	Distribución radial de candidatos a CGs rojos cercanos a NGC 3268.	60
5.8.	Distribución radial de candidatos a CGs azules.	61
5.9.	Distribución radial de candidatos a CGs rojos.	62
5.10.	Distribución acimutal de candidatos a CGs.	63
5.11.	Distribución acimutal de candidatas a UCDs.	64
5.12.	Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs, diferenciadas por magnitud y color.	65

Índice de cuadros

1.1. UCDs, CGs brillantes y núcleos de dE,N obtenidos en la literatura.	8
1.2. Cúmulos globulares de la Vía Láctea	9
1.3. Galaxias E en el cúmulo de Fornax	11
3.1. Número de candidatas a UCDs en torno a cada galaxia dominante, discriminadas por color y magnitud	35
4.1. Parámetros obtenidos por ajustes de mínimos cuadrados a las funciones de luminosidad.	46

Capítulo 1

Introducción

1.1. Galaxias Enanas Ultracompactas

1.1.1. Características generales y contexto histórico

Las galaxias enanas ultracompactas (UCDs, de aquí en más) poseen propiedades intermedias entre los cúmulos globulares (CGs, de aquí en más) y las galaxias enanas de tipo temprano. Si bien aún no se ha alcanzado consenso en la definición de estos objetos, en líneas generales se los considera como objetos que presentan brillos intrínsecos $-13.5 < M_V < -11$ mag, siendo por lo tanto más brillantes que CGs pero más débiles que galaxias elípticas compactas o tipo M32. Sus masas se encuentran en el rango de 10^6 a $10^8 M_\odot$ y poseen radios a mitad de luminosidad de 10 a 100 pc. Todos estos límites han sido adoptados siguiendo el reciente trabajo de revisión de Hilker (2009).

Fueron descubiertas hace una década en los alrededores de NGC 1399, la galaxia central del cúmulo de Fornax, cuando Minniti et al. (1998) lograron confirmar mediante velocidades radiales como miembro del cúmulo un objeto puntual con $M_V = -12.5$. Posteriormente otros trabajos ampliaron la muestra de candidatas a UCDs del cúmulo de Fornax (Hilker et al. 1999, Drinkwater et al. 2000, Gregg et al. 2009). Al día de hoy se las ha identificado en varios de los cúmulos más cercanos. Haşegan et al. (2005) las encontraron en torno a M87 en el cúmulo de Virgo, recibiendo la denominación *Objetos de transición enanas-globulares* (DGTO según sus siglas en inglés). Fueron estudiadas por Evstigneeva et al. (2008) en Fornax y Virgo. Wehner et al. (2007) y Misgeld et al. (2008) realizaron trabajos sobre estos objetos en el cúmulo Hydra I. Mieske et al. (2007, 2009) emprendieron su búsqueda en el de Centaurus. También Rejkuba et al. (2007) los estudiaron en las proximidades de NGC 5128, entre otros trabajos referidos al tema. Por tratarse de objetos puntuales o sólo marginalmente resueltos a estas distancias, en el

pasado habían sido considerados objetos de fondo, con lo cual su estudio aún es escaso y no se comprende acabadamente la naturaleza de estos objetos.

Las candidatas a UCDs pueden ser seleccionadas, en principio, a partir de las distribuciones de color de objetos puntuales en los alrededores de galaxias brillantes. En tales distribuciones, los CGs asociados a las galaxias presentan distribuciones bimodales (CGs con menor y mayor contenido de metales, i.e. *azules* y *rojos* respectivamente; ver por ej. el trabajo de revisión de Brodie & Strader 2006), pero los objetos más brillantes ($M_V < -11$ mag aprox.), cuando están presentes, muestran distribuciones unimodales, siendo estos últimos identificados como candidatas a UCDs. Se han encontrado tales distribuciones unimodales en los alrededores de galaxias centrales de cúmulos (Ostrov et al. 1998, Dirsch et al. 2003a, Bassino et al. 2006a, 2008). A través de estudios espectroscópicos se sugiere que la metalicidad de las UCDs es similar a la de los CGs rojos (Mieske et al. 2006), pero la evidencia no es concluyente.

Trabajos recientes indican que CGs masivos, que se encontrarían en rangos de luminosidad y masa cercanos a los típicos de las UCDs, podrían presentar evidencias de poblaciones estelares múltiples. Ejemplos de estos objetos son ω Cen en la Vía Láctea (Lee et al. 1999, Piotto 2009) y G1=Mayall II en Andrómeda (por ej. Meylan et al. 2001, Ma et al. 2009), con lo cual la segregación entre UCDs y CGs no está claramente establecida.

1.1.2. Tamaños típicos

Drinkwater et al. (2000), a través del Relevamiento Espectroscópico del Cúmulo de Fornax (FCSS, según sus siglas en inglés), pudieron identificar cinco objetos compactos como miembros del cúmulo de Fornax. Uno de ellos se encontraba parcialmente resuelto, permitiéndoles estimar una escala de tamaños (HWHM, mitad de ancho a altura mitad) a partir de una deconvolución del “seeing” sobre el ancho de altura mitad (FWHM). El valor hallado, alrededor de 80 pc, es muy superior a los tamaños calculados para cualquier CG conocido (los radios efectivos de CGs en la Vía Láctea y en M31, tanto rojos como azules, son menores a 10 pc, tal y como se muestra, por ejemplo, en Larsen & Brodie 2003).

Mieske et al. (2008) estudiaron una muestra de 15 objetos confirmados como miembros del cúmulo de Fornax mediante espectroscopía de alta resolución. Utilizando fotometría del HST (Telescopio Espacial Hubble), estimaron para estos objetos radios a mitad de luminosidad (“half-light radius”) que abarcan $4.0 < r_h < 89.7$ pc (el límite superior se corresponde con el valor obtenido para el objeto identificado en dicho trabajo como FCOS 1 – 2053), coincidiendo en algunos casos con el rango de tamaños propio de los CGs.

Evstigneeva et al. (2007) estudiaron una muestra de seis UCDs pertenecientes al cúmulo de Virgo (confirmadas como miembros por velocidades radiales), mediante fotometría del HST. En cinco de estos casos obtuvieron radios a mitad de luminosidad de unas pocas decenas de parsecs mediante el ajuste de un perfil de King generalizado. Sin embargo, en el más brillante de los objetos muestreados (identificado como VUCD 7) discriminaron dos componentes, ajustando un perfil de King para el “core”, y uno de Sérsic para el halo de la UCD. En este caso obtuvieron un valor de $r_h \approx 97$ pc. Posteriormente, Evstigneeva et al. (2008) analizaron en una muestra que contenía UCDs pertenecientes a los cúmulos de Virgo y Fornax, la existencia de una correlación entre tamaños y brillos ajustando una recta de regresión. En su trabajo plantean la posibilidad de que los dos objetos más brillantes de la muestra (identificados uno como FCOS 1 – 2053 en Mieske et al. 2008, y el restante como VUCD 7 en Evstigneeva et al. 2007), que ostentan envolturas apreciablemente más extendidas que el resto, sean de una naturaleza distinta.

También ha sido descripta una correlación entre el tamaño y el brillo en los núcleos de galaxias de tipo temprano, como se indica en el relevamiento realizado por Côté et al. (2006) en el cúmulo de Virgo. En el trabajo indican que núcleos más brillantes presentan mayores radios a mitad de luminosidad. También comparan la distribución de radios obtenida a partir de ellos con las provenientes de una muestra de candidatos a CGs de Virgo y siete UCDs. Encuentran que, si bien las distribuciones de núcleos de galaxias tempranas y candidatos a CGs tienen un cierto solapamiento (núcleos más compactos tienen radios del orden de aquellos propios de candidatos a CGs), el comportamiento de ambas difiere, encontrándose los radios de candidatos a CGs mucho más concentrados en torno a su moda. Por otro lado, consideran que los radios a mitad de luminosidad de las UCDs podrían guardar relación con la distribución obtenida de los núcleos de galaxias, aunque reconocen que la selección de las mismas se basó en su luminosidad y radio, lo cual daría lugar a que la muestra pueda estar sesgada.

En el cúmulo de Centauro, Mieske et al. (2007) identificaron mediante velocidades radiales 27 objetos compactos como miembros del cúmulo; ocho de estos se encontraban en imágenes de archivo del HST, lo que les permitió estimar sus radios a mitad de luminosidad (r_h). Uno de ellos presentaba dimensiones de $r_h \approx 30$ pc, siendo el único que ellos clasificaron como una UCD. El resto poseía radios de orden similar al de los CGs. Puesto que el rango de magnitudes de objetos compactos detectados es reducido (no hallaron UCDs similares en brillo a objetos como FCOS 1 – 2053 en el cúmulo de Fornax), no es posible estimar a partir de su muestra una correlación entre tamaños y brillos como la obtenida en trabajos anteriores. Sin embargo, mediante la comparación gráfica con UCDs obtenidas de la literatura, se observa

un buen acuerdo entre sus estimaciones de radios y las de aquellos objetos utilizados por otros autores para mapear la correlación.

Por último, debemos destacar la existencia de objetos que podrían considerarse como el eslabón entre UCDs y CGs, tales como ω Cen en la Vía Láctea (Harris 1996), Mayall II en M 31 (Meylan et al. 2001), HCH99-18 en NGC 5128 (Rejkuba et al. 2007) o W3 en NGC 7252 (Maraston et al. 2004). Todos estos objetos tienen radios a mitad de luminosidad superiores a 10 pc, escalas de tamaño similares, y en algunos casos mayores, a las de objetos que otros autores han clasificado como UCDs. En este sentido cabe destacar que, si bien en varios de los cúmulos de galaxias estudiados hasta la fecha se encuentra esta correlación entre tamaños y brillos, la misma presenta una dispersión considerable, lo cual dificulta la utilización de estos parámetros para distinguir entre UCDs y CGs brillantes.

1.1.3. Metalicidades y estimaciones de edades

Evstigneeva et al. (2007) determinaron índices de Lick para seis UCDs en el cúmulo de Virgo, lo cual les permitió, aplicando modelos de poblaciones estelares simples (SSPs), obtener estimadores de edades y metalicidades $[Z/H]$. De esta forma, calcularon el cociente de abundancias $[\alpha/Fe]$, el cual es un buen indicador de las escalas temporales de formación estelar en galaxias. Puesto que los elementos α son producidos con rapidez por supernovas de Tipo II, los cocientes de abundancias suprasolares indican que el sistema sufrió un rápido enriquecimiento por supernovas Tipo II, a consecuencia de un breve evento de formación estelar masiva. En tanto, los elementos del pico del Fe es generado por supernovas Tipo Ia en escalas de tiempo mayores, por lo que cocientes de abundancias solares o menores implican que el enriquecimiento del medio fue paulatino, a lo largo de un intervalo de tiempo mayor (van Zee et al. 2004). Cabe la aclaración de que, siendo $[\alpha/Fe]_{\odot} \approx 0.0$, se consideran cocientes de abundancia suprasolares si $[\alpha/Fe] > 0.3$. En los objetos estudiados en dicho trabajo, se encontró que cinco de las seis UCDs presentan cocientes de abundancias suprasolares, en tanto la restante posee valores en el rango solar.

Un estudio similar fue realizado por Geha et al. (2003) para una muestra de 17 galaxias elípticas enanas del cúmulo de Virgo, once de ellas clasificadas como dE,N (enanas elípticas nucleadas). A partir de la comparación con modelos de SSPs encontraron que la mayoría de las galaxias estudiadas presentaban cocientes de abundancias $[\alpha/Fe]$ solares, con una dispersión que abarcaba el rango $-0.3 < [\alpha/Fe] < 0.3$. La comparación de estos resultados con los de Evstigneeva et al. (2007) parecería indicar que algunas UCDs y dE,N pertenecientes al cúmulo de Virgo podrían tener historias de formación

estelar similares.

A partir de comparar sus observaciones con modelos de SSPs, Evstigneeva et al. (2007) determinaron que su muestra de UCDs estaba compuesta por objetos con edades superiores a 8 Gyr (1 Gyr = 10^9 años), y metalicidades entre $-1.35 < [Z/H] < 0.35$. También señalan que las edades, metalicidades y abundancias determinadas en su trabajo son consistentes con los valores encontrados en la literatura para los CGs de galaxias pertenecientes al cúmulo de Virgo, como M 49 y M 87. Mediante la comparación de sus observaciones con modelos de SSPs, Hau et al. (2009) determinaron para la UCD hallada en M 104 una edad de 12.6 Gyr, cociente de abundancias $[\alpha/\text{Fe}]$ solar y metalicidad $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.08$. Este último valor se corresponde con los hallados para CGs muy ricos en metales (por ej., Brodie & Strader 2006).

Considerando una muestra conformada por UCDs y CGs brillantes del cúmulo de Fornax, Mieske et al. (2006) encontraron un quiebre en los valores de metalicidad a una magnitud de $M_V \approx -11$. Objetos más débiles presentan una mayor dispersión en metalicidades, en tanto para objetos más brillantes el rango de valores se encuentra acotado en metalicidades algo mayores. Calcularon metalicidades medias de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.62$ para los objetos compactos brillantes (típicamente considerados UCDs), y $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.18$ para los objetos más débiles, cuyo rango de luminosidad es propio de los CGs. A su vez estimaron metalicidades de las regiones centrales de cinco galaxias dE,N, encontrando que son significativamente más pobres en metales, lo cual apuntaría a desestimar que estos objetos puedan ser los progenitores de la mayoría de las UCDs encontradas en Fornax. Mieske et al. (2007) realizaron un estudio de una muestra de objetos compactos en el cúmulo de Centauro con magnitudes $-12.2 < M_V < -10.9$, encontrando metalicidades medias de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.08$ para la componente principal Cen 30, y de $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.39$ para la subcomponente Cen 45, rica en galaxias espirales. A partir de contrastar modelos de SSPs con las observaciones de UCDs, encuentran que éstas son consistentes con una población de 12 Gyr de edad y cocientes de abundancias $[\alpha/\text{Fe}]$ solares. Estos valores son similares a los esperados en CGs ricos en metales, y según los autores no presentan diferencias significativas con los resultados obtenidos para UCDs de Fornax.

Por otro lado, en su estudio del CG Mayall II en M 31, Meylan et al. (2001) determinaron la metalicidad mediante el ajuste de modelos a la pendiente de la rama de las gigantes rojas (RGB). Ellos obtuvieron $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.95$, y argumentaron que la dispersión de la RGB no podía deberse exclusivamente a errores fotométricos, sino además a una dispersión de metalicidades en el objeto. Los autores indican que esta dispersión podría deberse a tres factores: (a) que el CG haya presentado procesos de auto-enriquecimiento; (b) que en la nube molecular donde se originó el CG la metalicidad fuera

inhomogénea; (c) que Mayall II no sea en realidad un CG, sino el remanente de un objeto de mayores dimensiones. Anteriormente, Huchra et al. (1991) habían determinado metalicidades para unos 150 CGs de M 31 a partir de espectros integrados, determinando en el caso de Mayall II $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.08$.

Ma et al. (2009) realizaron un estudio fotométrico de Mayall II que cubre el rango de longitudes de onda entre 1538 y 20000 Å. Tras ajustar modelos de SSPs indican que G1 se encontraría entre las componentes de M31 más viejas y masivas, habiéndose formado menos de 2 Gyr luego del Big Bang. Este CG presenta una considerable emisión en el lejano ultravioleta (FUV). Consideran que esto es consistente con trabajos de otros autores (Lee et al. 2003), quienes señalan que el flujo en el FUV permite discriminar CGs en intervalos de edades. De esta forma, en CGs jóvenes (< 1 Gyr) y viejos (> 14 Gyr), el cociente entre flujos del FUV y el óptico exhibe valores significativos, mientras que en CGs de edad intermedia la emisión en el FUV es menos apreciable. Este análisis se aplica particularmente a CGs rojos.

Dicho estudio arriba a similares conclusiones que el realizado por Lee et al. (1999) sobre ω Cen, quienes a partir de la dispersión de la RGB describen la existencia de poblaciones con distintas metalicidades, asociándolo con distintos eventos de formación estelar. Mediante modelos estiman que las estrellas más ricas en metales son alrededor de 2 Gyr más jóvenes que la población más pobre en metales, período durante el cual habrían ocurrido varios eventos de formación estelar. En este sentido, indican que el extenso período abarcado por los distintos eventos podría evidenciar que ω Cen no se habría formado junto con el resto de los CGs, y lo asocian con un progenitor del tipo de la galaxia enana de Sagittarius, que está siendo disociada por interacciones de marea con la Vía Láctea.

En su estudio del CG W3 en NGC 7252, Maraston et al. (2004) encontraron que la utilización de modelos de SSPs con metalicidad solar y una edad de 500 Myr ($1 \text{ Myr} = 10^6$ años), es consistente con los datos observacionales de los que ellos disponían en cuanto a colores y relación M/L . Según estos autores, esto situaría el momento de formación de W3 poco después del inicio del “merger” que dio origen a NGC 7252, hace aproximadamente 1 Gyr.

1.1.4. Relación luminosidad - dispersión central de velocidades

La relación entre dispersión central de velocidades (σ_0) y luminosidades para galaxias elípticas (galaxias E), corroborada a partir de datos observacionales por primera vez por Faber & Jackson (1976), ha sido ampliamente estudiada en la literatura. En esta sección comentaremos algunos resultados

obtenidos por diversos trabajos que estimaron estas cantidades para objetos compactos, tanto en el régimen de UCDs como en el de CGs brillantes.

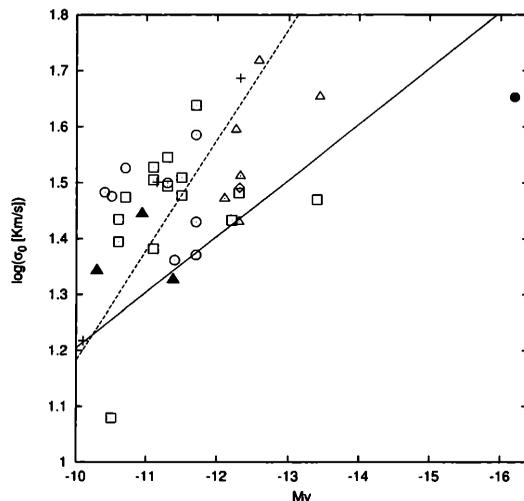


Figura 1.1: M_V y σ_0 para objetos obtenidos de la literatura. La línea sólida representa la relación Faber-Jackson para galaxias E (Faber & Jackson 1976, Graham 2002, Karick et al. 2003, Drinkwater et al. 2001), en tanto la línea punteada es el ajuste por mínimos cuadrados para una muestra de CGs de la Vía Láctea (MacLaughlin & van der Marel 2005, Mackey & van den Bergh 2005). Las UCDs de Fornax (Mieske et al. 2008) están representadas por cuadrados vacíos (si dispusieron de fotometría del HST) y círculos vacíos (en caso contrario); las UCDs confirmadas en Virgo (Evstigneeva et al. 2007) se indican con triángulos vacíos; núcleos de galaxias elípticas enanas (Geha et al. 2002) se representan mediante cruces; una UCD asociada a M 104 (Hau et al. 2009) señalada por un rombo vacío y W3 en NGC 7252 (Maraston et al. 2004) indicado por un círculo lleno; por último ω Centauri (Harris, 1996), Mayall II en M 31 (Meylan et al. 2001) y $HCH99-18$ en NGC 5128 (Rejkuba et al. 2007) fueron representados por triángulos llenos.

En la Figura 1.1 se grafica el plano M_V vs. σ_0 para los objetos listados en la Tabla 1.1. La recta punteada indica el ajuste por mínimos cuadrados a una muestra de CGs de la Vía Láctea, indicados en la Tabla 1.2; sus magnitudes absolutas visuales se obtuvieron del trabajo de Mackey & van den Bergh (2005), en tanto las dispersiones centrales de velocidades fueron calculadas por MacLaughlin & van der Marel (2005). La recta continua corresponde al ajuste de la relación Faber-Jackson para galaxias E. La pendiente de esta recta es la indicada por Faber & Jackson (1976), en tanto la ordenada al origen la obtuvimos a partir del ajuste del conjunto de galaxias E pertenecientes al

Tabla 1.1: UCDs, CGs brillantes y núcleos de dE,N obtenidos en la literatura. Se listan objetos publicados por Mieske et al. (2008)^a, Evstigneeva et al. (2007)^b, Geha et al. (2002)^c, Hau et al. (2009)^d, Maraston et al. (2004)^e, Harris (1996)^f, Meylan et al. (2001)^g y Rejkuba et al. (2007)^h.

ID	M_V	σ_0 [km s ⁻¹]	r_h [pc]	Masa [$10^6 M_\odot$]
W3 ^e	-16.2	45.0	17.5	80±20
VUCD7 ^b	-13.44	45.1	96.8	88±21
F-19 ^a	-13.4	29.5	89.7	93.6±15.0
VUCD3 ^b	-12.58	52.2	18.7	50±7
VUCD5 ^b	-12.32	32.5	17.9	29±4
VCC 1254 ^c	-12.32	48.6	12.34	—
VUCD4 ^b	-12.30	26.9	22.0	24±6
VUCD1 ^b	-12.26	39.3	11.3	28±5
VUCD6 ^b	-12.10	29.6	14.8	18±5
SUCD1 ^d	-12.31	31.0	14.7	33±17
F-24 ^a	-12.3	30.3	29.5	24.5±4.3
F-1 ^a	-12.2	27.1	23.1	16.2±3.2
F-5 ^a	-11.7	43.5	5.0	13.7±2.7
F-3 ^a	-11.7	38.5	—	—
F-18 ^a	-11.7	23.5	—	—
F-23 ^a	-11.7	26.9	—	—
F-12 ^a	-11.5	30.0	10.3	8.3±1.6
F-11 ^a	-11.5	32.3	3.6	5.7±1.0
F-2 ^a	-11.4	23.0	—	—
HCH99-18 ^h	-11.38	21.2	18.3	14.0
F-9 ^a	-11.3	31.2	9.1	14.1±2.4
F-17 ^a	-11.3	35.1	3.3	6.3±1.0
F-8 ^a	-11.3	31.6	—	—
VCC 1073 ^c	-11.15	31.7	9.97	—
F-7 ^a	-11.1	24.1	14.9	10.5±2.3
F-22 ^a	-11.1	32.0	10.0	5.3±1.0
F-6 ^a	-11.1	33.7	7.3	12.5±2.3
Mayall II ^g	-10.94	27.8	14.0	7.3±0.7
F-34 ^a	-10.7	29.8	4.0	5.5±1.0
F-40 ^a	-10.7	33.6	—	—
F-51 ^a	-10.6	27.2	4.2	3.5±0.7
F-53 ^a	-10.6	24.8	4.5	3.9±0.8
F-59 ^a	-10.5	12.0	5.7	1.3±0.6
F-60 ^a	-10.5	29.9	—	—
F-64 ^a	-10.4	30.4	—	—
ω Cen ^f	-10.29	22.0	13.0	3.0
VCC 1876 ^c	-10.1	16.5	8.13	—
VCC 452 ^c	-8.47	7.7	11.49	—
VCC 1577 ^c	-8.78	9.8	11.39	—

Tabla 1.2: CGs de la Vía Láctea utilizados en el ajuste de la recta indicada en la Figura 1.1. En la tabla se listan M_V (Mackey & van den Bergh, 2005), y σ_0 (MacLaughlin & van der Marel, 2005).

ID	M_V	$\sigma_0[\text{km s}^{-1}]$
NGC 5824	-8.8411.60±	2.32
NGC 5904	-8.81 5.70 ±	1.14
NGC 6093	-8.2312.40±	2.48
NGC 6121	-7.20 4.20 ±	0.84
NGC 6171	-7.13 4.10 ±	0.82
NGC 6205	-8.70 7.10 ±	1.42
NGC 6218	-7.32 4.50 ±	0.90
NGC 6254	-7.48 6.60 ±	1.32
NGC 6341	-8.20 5.90 ±	1.18
NGC 6362	-6.94 2.80 ±	0.56
NGC 6366	-5.77 1.30 ±	0.26
NGC 6388	-9.4218.90±	3.78
NGC 6402	-9.12 8.20 ±	1.64
NGC 6441	-9.6418.00±	3.60
NGC 6535	-4.75 2.40 ±	0.48
NGC 6656	-8.50 9.00 ±	1.80
NGC 6712	-7.50 4.30 ±	0.86
NGC 6715	-10.0114.20±	2.84
NGC 6779	-7.38 4.00 ±	0.80
NGC 6809	-7.55 4.90 ±	0.98
NGC 6864	-8.5510.30±	2.06
NGC 6934	-7.46 5.10 ±	1.02
NGC 7089	-9.02 8.20 ±	1.64
NGC 104	-9.4211.50±	2.30
NGC 1851	-8.3310.40±	2.08
NGC 1904	-7.86 5.20 ±	1.04
NGC 2419	-9.58 3.00 ±	0.60
NGC 2808	-9.3913.40±	2.68
NGC 288	-6.74 2.91 ±	0.58
NGC 4147	-6.16 2.60 ±	0.52
NGC 4590	-7.35 2.50 ±	0.50
NGC 5272	-8.93 5.60 ±	1.12
NGC 5286	-8.61 8.00 ±	1.60
NGC 5466	-6.96 1.70 ±	0.34
NGC 5694	-7.81 5.50 ±	1.10

cúmulo de Fornax que se listan en la Tabla 1.3. Para esto, las dispersiones centrales de velocidades se obtuvieron del trabajo de Graham (2002),

mientras que sus magnitudes son las calculadas por Karick et al. (2003), considerando el módulo de distancias determinado por Drinkwater et al. (2001). Puesto que las galaxias en el trabajo de Graham (2002) estaban indicadas por la nomenclatura del “New General Catalog”, mientras que en el trabajo de Karick et al. (2003) utilizaron la adoptada en el “Fornax Cluster Catalog”, realizamos la identificación cruzada de los objetos mediante “NASA/IPAC Extragalactic Database”.

Los símbolos corresponden a las UCDs confirmadas halladas por Evstigneeva et al. (2007) en el cúmulo de Virgo (triángulos vacíos), a las encontradas por Mieske et al. (2008) en el cúmulo de Fornax (cuadrados vacíos y círculos vacíos) y a una UCD ubicada en M 104 (Galaxia del Sombrero) por Hau et al. (2009, rombo vacío). Junto a estas UCDs se grafica la ubicación en el plano de tres CGs brillantes: ω Cen en la Vía Láctea (Harris, 1996), Mayall II en M 31 (Meylan et al. 2001) y HCH99 – 18 en NGC 5128 (Rejkuba et al. 2007), los cuales representan objetos de interés para comparar con las UCDs descubiertas hasta el momento. Por último, se observa en el gráfico la posición que ocuparían tres de los cinco núcleos de galaxias dE,N pertenecientes al cúmulo de Virgo estudiados por Geha et al. (2002), y W3, un objeto identificado por Maraston et al. (2004) como un CG asociado a NGC 7252, extremadamente brillante, que alcanza una magnitud absoluta $M_V = -16.2$.

Debemos aclarar el motivo de la discriminación en el trabajo de Mieske et al. (2008) entre los objetos que presentan imágenes de HST y aquellos que no. Para obtener la dispersión central de velocidades a partir de la dispersión de velocidades medida, utilizaron un algoritmo que obtiene un modelo de N-cuerpos para la UCD a partir de su perfil de brillo. Debido a esto, sólo pudieron estimar la dispersión central de velocidades para los quince objetos que disponían de observaciones del HST; para las restantes ocho UCDs que componen la muestra, aquella se estimó a partir del valor medio de la razón σ_0/σ obtenida a partir de las primeras quince UCDs.

En el caso de los cinco núcleos de dE,N publicados por Geha et al. (2002), los valores de radios efectivos (R_{eff}) y σ_0 los obtuvimos a partir de los parámetros de los núcleos en el plano fundamental de galaxias elípticas, teniendo en cuenta las relaciones indicadas en ese mismo trabajo:

$$\kappa_1 \equiv (\log \sigma_0^2 + \log R_{\text{eff}})/\sqrt{2} \quad (1.1)$$

$$\kappa_2 \equiv (\log \sigma_0^2 + 2 \log I_{\text{eff}} - \log R_{\text{eff}})/\sqrt{6} \quad (1.2)$$

$$\kappa_3 \equiv (\log \sigma_0^2 - \log I_{\text{eff}} - \log R_{\text{eff}})/\sqrt{3} \quad (1.3)$$

En el gráfico se observa que objetos más débiles que $M_V \approx -12$ parecen ubicarse preferentemente en zonas del plano próximas a la extrapolación del ajuste a los CGs de la Vía Láctea. Se encuentran objetos más brillantes cercanos a ambas rectas. Aquellos próximos a la relación Faber-Jackson para galaxias E tienen masas superiores a las $15 \times 10^6 M_\odot$. Objetos como VUCD3 o VUCD1, que pese a ser UCDs relativamente masivas y con radios superiores a los 10 pc, alcanzan un buen acuerdo con el ajuste a los CGs de la Vía Láctea, plantean la posibilidad que el origen de las UCDs, aún con rangos de masa, luminosidad o radio similares, pueda deberse a diversas causas. La posición de los tres CGs brillantes incluidos en el gráfico aparenta coincidir con la relación de Faber-Jackson para CGs. No obstante, la ubicación de HCH99 – 18, el más luminoso y masivo de ellos, aparenta alcanzar un buen acuerdo con ambas relaciones. Los núcleos de galaxias dE,N se encuentran en el plano cerca de la mayoría de las UCDs, siguiendo la extrapolación hacia magnitudes más brillantes de la relación seguida por CGs de la Vía Láctea. Esto implica que su ubicación dista de la de aquellas UCDs brillantes que parecen seguir la relación de Faber-Jackson.

Tabla 1.3: Galaxias elípticas en el cúmulo de Fornax utilizadas en el ajuste de la recta indicada en la Figura 1.1. En la tabla se listan M_V (Karick et al. 2003, Drinkwater et al. 2001), y σ_0 (Graham 2002).

ID	σ_0 [km s ⁻¹]	M_V
NGC 1351	147	-20.15
NGC 1374	207	-20.43
NGC 1379	130	-20.40
NGC 1399	359	-22.18
NGC 1404	242	-21.58
NGC 1427	170	-20.64

La posición de W3, el CG más masivo conocido hasta la fecha, dista considerablemente de las zonas ocupadas por la mayoría de las UCDs y los núcleos de dE,N. En este sentido, Maraston et al. (2004) señalan que su posición en el plano fundamental dista tanto de las ocupadas por los CGs (lo atribuyen a no ser lo suficientemente compacto para seguir la secuencia de los CGs) como de la localización de las galaxias E enanas (según los autores, por ser más concentrado que las galaxias E más débiles).

1.1.5. Estimaciones de masas y cocientes M/L

Mieske et al. (2008) estimaron masas para las 15 UCDs pertenecientes al cúmulo de Fornax para las cuales obtuvieron fotometría del HST. Para los catorce objetos menos masivos, sus resultados abarcan un rango amplio de masas dado por $1.3 \times 10^6 < M [M_\odot] < 24.5 \times 10^6$, en tanto que para el restante (cuyo brillo en el filtro V de Johnson es una magnitud superior al del resto), estimaron una masa de $93.6 \times 10^6 M_\odot$. También calcularon para estos 15 objetos sus relaciones M/L , las cuales, sumadas a valores obtenidos en la literatura para otros objetos compactos, muestran un claro incremento de las relaciones M/L para objetos con masas superiores a $2 \times 10^6 M_\odot$. Objetos más masivos que este límite poseen relaciones M/L hasta dos veces mayores que los menos masivos; las UCDs indicadas en este trabajo con masas entre $3.5 \times 10^6 < M [M_\odot] < 8.3 \times 10^6$, poseen relaciones M/L entre $1.6 < M/L [M_\odot/L_\odot] < 3.2$. En cambio, para aquellas con masas superiores a $10^7 M_\odot$ se encuentran en el rango $(2.5 - 5.3) M_\odot/L_\odot$. Por último, el menos masivo de los quince objetos posee $1.3 \times 10^6 M_\odot$ y una relación M/L de apenas $0.9 M_\odot/L_\odot$. En este contexto, consideran factible utilizar el valor de $2 \times 10^6 M_\odot$ para discriminar entre CGs y UCDs.

Evstigneeva et al. (2007), en su estudio de objetos compactos en el cúmulo de Virgo, determinaron masas para seis UCDs. Encontraron que todas ellas presentaban masas en el rango $1.3 \times 10^6 < M [M_\odot] < 24.5 \times 10^6$, con la excepción de la más brillante de ellas, VUCD7, que posee una masa superior. Las estimaciones de relaciones M/L efectuadas por ellos en el filtro V de Johnson, dan valores en el rango de $(3 - 5) M_\odot/L_\odot$, superiores a los encontrados por otros autores en varias de las UCDs del cúmulo de Fornax. Pese a esto, señalan que las relaciones M/L por ellos encontradas son consistentes, dentro de las incertezas, con los valores predichos por modelos de SSPs. De este modo, las UCDs en Virgo no requerirían la presencia de halos de materia oscura para explicar sus relaciones M/L . Sin embargo aclaran que estos resultados están restringidos a las regiones centrales del cúmulo, y no puede descartarse, en base a las observaciones disponibles, la posible existencia de una contribución de una componente de materia oscura a mayores radios.

En cuanto a las masas de las UCDs encontradas en Virgo, si bien son claramente superiores a las determinadas en la mayoría de los CGs estudiados en la literatura, remarcan que se ubican dentro de los límites teóricos para los CGs que podrían haberse formado en galaxias masivas como NGC 1399, en el cúmulo de Fornax.

En este sentido, debemos destacar las masas obtenidas para algunos objetos identificados como CGs brillantes o posibles UCDs asociados a diversas galaxias, cuyas estimaciones se encuentran próximas a las obtenidas por los

dos trabajos mencionados en los párrafos precedentes. Por citar algunos casos, podemos mencionar Mayall II en M 31, W3 en NGC 7252 o HCH99 – 18 en NGC 5128, para los cuales las masas viriales obtenidas son $7.37 \times 10^6 M_{\odot}$ (Ma et al. 2009), $8 \times 10^7 M_{\odot}$ (Maraston et al. 2004) y $1.4 \times 10^7 M_{\odot}$ (Rejkuba et al. 2007), respectivamente.

1.1.6. Posibles escenarios de formación para las UCDs

Debido al escaso tiempo transcurrido desde el descubrimiento de las UCDs y al limitado número de sistemas estudiados en la búsqueda de este tipo de objetos, persiste en la literatura un número apreciable de teorías disímiles que apuntan a explicar cuál es su naturaleza y qué fenómenos dieron lugar a su formación. Cada uno de los escenarios de formación propuestos presenta coincidencias con los resultados derivados de algunas de las observaciones realizadas, pero en todos ellos existen aún inconsistencias que deben ser resueltas. En los párrafos subsiguientes enunciamos algunos de estos escenarios.

1. Las UCDs podrían ser remanentes de galaxias, en particular de galaxias elípticas enanas nucleadas (dE,N), que han sido desmembradas por las fuerzas de marea de las galaxias dominantes de los cúmulos (Bassino et al. 1994, Bekki et al. 2001). Trabajos basados en simulaciones numéricas sugieren que, a consecuencia de la disrupción de galaxias dE,N por la interacción con el potencial gravitatorio del cúmulo, podrían resultar objetos que poseerían características similares a las de aquellas UCDs confirmadas como tales.

En este sentido, algunos trabajos han logrado determinar relaciones M/L que alcanzarían un mejor acuerdo con los esperados en objetos que presentan halos de materia oscura, por sobre el rango de valores usual en CGs brillantes (Mieske et al. 2008). Sin embargo, para otorgarle un mayor crédito a esta teoría aún se deben sortear las diferencias en colores y metalicidades que se han encontrado entre los núcleos de galaxias elípticas enanas estudiados y algunas de las UCDs detectadas hasta la fecha (por ej., Karick et al. 2003).

De Propris et al. (2005) derivaron, mediante imágenes del HST, perfiles de brillo superficial para UCDs en el cúmulo de Fornax y núcleos de galaxias elípticas enanas nucleadas (dE,N) en el cúmulo de Virgo. A partir de sus resultados se observa que las UCDs son más extendidas y tienen brillos superficiales mayores que los núcleos de dE,N, cuyas luminosidades, colores y tamaños son semejantes a los observados en CGs galácticos. Sin embargo, consideran apropiado aclarar que la muestra

de UCDs utilizadas en este trabajo se corresponde con los objetos más brillantes encontrados en el cúmulo de Fornax, cuya naturaleza podría ser distinta que la de UCDs más débiles halladas también en Fornax, o en los cúmulos de Virgo o Centauro.

2. Las UCDs se habrían formado a partir de la fusión de varios cúmulos de estrellas jóvenes (por ej. Fellhauer & Kroupa 2002). Un ejemplo de este tipo de procesos podrían ser las galaxias Antena, donde se han detectado un gran número de cúmulos estelares masivos jóvenes surgidos del violento evento de formación que sufre el sistema, producto de la colisión entre las galaxias. Se ha indicado que estos cúmulos jóvenes estarían formando complejos masivos (Whitmore et al. 1999), los cuales podrían actuar como progenitores de las UCDs.

Fellhauer & Kroupa (2005) propusieron que este escenario era el responsable de la existencia de W3, el CG hallado en NGC 7252. En sus modelos simulan a los cúmulos estelares interactuantes como esferas de Plummer con radios de 4 a 10 pc, y masas en el rango $10^6 < M[M_{\odot}] < 5 \times 10^6$. En base a los mismos, encuentran que dada la edad propuesta para W3 por otros autores (por ej., Maraston et al. 2004), si éste fuese resuelto, aún debería observarse la estructura de cúmulos estelares que no han sido completamente disueltos.

Considerando la edad obtenida por diversos trabajos para las UCDs de Fornax y Virgo, de ser éste su origen, los procesos de colisión de galaxias que dieron lugar al evento de formación masiva, debieron ocurrir en etapas tempranas en la historia de los cúmulos. Sin embargo, debido a los rangos de metalicidades encontrados en este tipo de objetos, el gas del medio debería haber sido enriquecido previamente, o su evolución ser lo suficientemente rápida como para permitir su autoenriquecimiento. Las evidencias de múltiples eventos de formación estelar que indican estudios incluso de CGs brillantes (Lee et al. 1999), serían una prueba de la factibilidad de esta hipótesis.

Este escenario permitiría la existencia de UCDs y CGs masivos en entornos de relativamente baja densidad. La evidencia observacional indica la existencia de objetos compactos masivos en este tipo de ambientes, como ω Cen en la Vía Láctea, Mayall II en M 31 (Meylan et al. 2001), W3 en NGC 7252 (Maraston et al. 2004) o UCDs encontradas en M 104 (Hau et al. 2009)). Bastian et al. (2006) describen el mecanismo por el cual cúmulos estelares jóvenes podrían perder una porción importante de su masa estelar, causando la disrupción del sistema; esto permitiría explicar el escaso número de UCDs que se detectan en las

observaciones. En oposición, las UCDs más brillantes poseen relaciones M/L elevadas, que deberían ser explicadas por algún mecanismo.

3. Las UCDs serían los objetos más brillantes del sistema de CGs de las galaxias, y su formación habría ocurrido junto con la de sus congéneres menos luminosos. Si las galaxias más masivas son capaces de poseer nubes moleculares con mayor masa, debería existir una correlación entre el brillo de los objetos más luminosos de cada sistema de CGs y la luminosidad de la galaxia a la que están asociados (Hilker 2009).

En este sentido, como intentaremos corroborar más adelante en esta tesis, el suave comportamiento del extremo brillante de la función de luminosidad de los sistemas de CGs no entraría en contradicción con la existencia de objetos en el rango de las UCDs. En el caso en que UCDs y CGs hubiesen surgido en eventos de formación simultáneos y presentaran una historia evolutiva similar, restaría determinar cuál es el motivo de la existencia de una correlación entre tamaños y luminosidades de UCDs, pero no en el caso de CGs débiles, como ya hemos mencionado previamente.

4. Las UCDs serían galaxias enanas compactas, cuyos progenitores serían las galaxias enanas compactas azules (BCDs), que se formaron a partir de pequeñas sobredensidades en el espectro de potencia primordial de la materia oscura (Drinkwater et al. 2004). Si bien este escenario presenta la conveniencia de no requerir eventos externos que conduzcan a la formación de este tipo de objetos, el escaso número de objetos observados en el rango de masas comparables con estas galaxias dificulta su plausibilidad.

A partir de los trabajos citados en el presente capítulo podemos señalar que no existen evidencias concluyentes para afirmar que todos los objetos a los cuales se llama comúnmente UCDs pertenezcan a una misma población, o compartan orígenes y/o historias evolutivas. Debido a esto no podemos descartar que sea un conjunto de teorías, y no solo una, las que permitan develar el origen de las UCDs.

1.2. El cúmulo de Antlia

El cúmulo de Antlia ($l \approx 273^\circ$, $b \approx 19^\circ$) se encuentra a una distancia de aproximadamente 35 Mpc (Dirsch et al. 2003b), siendo considerado como el tercer cúmulo de galaxias más cercano después de Virgo y Fornax. Posee

una riqueza intermedia entre estos últimos, pero su densidad de galaxias es superior a la de ambos.

Pese a su cercanía, en el pasado el cúmulo había sido muy poco estudiado. Como antecedente, debemos señalar el relevamiento fotográfico realizado por Ferguson & Sandage (1990, en adelante FS90; 1991), con una magnitud límite de $B_T = 18$ mag. El estudio de FS90 estima que contiene 420 galaxias, lo que implica una población más numerosa que la de Fornax. Debido al escaso número de galaxias que contaban con datos de velocidades radiales, estos autores determinaron para las galaxias un estatus de pertenencia al cúmulo en base a criterios morfológicos.

En los últimos años, se ha iniciado un estudio de la parte central del cúmulo, dominado por dos galaxias elípticas gigantes, NGC 3258 y NGC 3268. La parte interna de los sistemas de CGs asociados a estas galaxias fueron estudiados por Dirsch, Richtler & Bassino (2003b) y Bassino, Richtler & Dirsch (2008), encontrándose evidencias de la presencia de UCDs. Los resultados enunciados en estos trabajos indican que los sistemas de CGs de NGC 3258 y NGC 3268 constan de unos pocos miles de objetos. La frecuencia específica (definida por Harris & van den Bergh 1981) de NGC 3268 se encuentra en el rango usual del hallado en galaxias E, mientras que en el caso de NGC 3258 es comparable con las frecuencias propias de galaxias E masivas ubicadas en los centros de cúmulos de galaxias (Dirsch et al. 2003b). La distribución espacial proyectada de los CGs aparenta ser elongada en la dirección de la línea que une las galaxias dominantes, lo cual podría indicar la presencia de fuerzas de marea entre ambas galaxias.

La estructura del cúmulo de Antlia es entonces compleja, pues consiste de dos subsistemas dominados por NGC 3258 y NGC 3268. Estudios en rayos-X han detectado emisiones extendidas alrededor de ambos sub-grupos, encontrándose que las mismas también son elongadas en la dirección de la línea que une ambas galaxias (Pedersen et al. 1997, Nakazawa et al. 2000), lo cual es consistente con los resultados mencionados anteriormente para las poblaciones de CGs. Las estimaciones de la masa dentro de un radio de 250 kpc, basadas en estos estudios de rayos-X, indican valores del orden de $10^{13} M_{\odot}$, comparables a los hallados para el cúmulo de Fornax.

Los resultados de estudios de la población de galaxias en la región central del cúmulo (Smith Castelli et al. 2008a, 2008b; Smith Castelli 2008) parecen indicar que las galaxias en torno a NGC 3268 constituirían un cúmulo pequeño, y aquellas situadas en los alrededores de NGC 3258 conformarían un grupo, menos numeroso que el primero pero más concentrado hacia la galaxia dominante. Corroborando lo observado en trabajos previos (Hopp & Materné 1985, Ferguson & Sandage 1990), también señalan que la distribución de galaxias presentaría una estructura elongada.

Capítulo 2

Datos y Reducción

2.1. Observaciones y reducción básica

El material observacional que se ha utilizado consiste en imágenes CCD de gran campo obtenidas en el Observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo (CTIO, Chile), con el telescopio Blanco de 4-m y la cámara MOSAIC II (<http://www.ctio.noao.edu/mosaic/manual/index.html>). Esta cámara, que consta de 8 CCDs, cubre un campo de $36' \times 36'$ (i.e. $370 \times 370 \text{ kpc}^2$ a la distancia de Antlia), siendo su escala de $0.27''/\text{pixel}$. Dichas imágenes corresponden a dos campos: uno de la región central del cúmulo de Antlia (en adelante “campo central”) y otro de un campo adyacente ubicado al Este de la misma (en adelante “campo Este”), utilizada para realizar una estimación más confiable de la contaminación de fondo.

Las imágenes del campo central fueron obtenidas en las noches del 4/5 de abril del 2002 por B. Dirsch. Las imágenes finales con las cuales se trabajó son el resultado de la combinación, en el filtro R de Kron-Cousins, de tres imágenes individuales, y en el filtro C del sistema de Washington, de siete. Todas ellas poseen un tiempo de integración de 600 segundos. En el caso del campo Este, las imágenes se obtuvieron en las noches del 25/26 de marzo del 2004 por L. Bassino y M. Gómez, contando con cinco observaciones en el filtro R de Kron-Cousins con un tiempo de integración de 600 segundos y siete en el filtro C del sistema de Washington con un tiempo de integración de 900 segundos.

Para la primera etapa de reducción de todas estas imágenes, realizada previamente al desarrollo de esta Tesis, se ha utilizado el proceso estándar mediante el paquete de tareas “MSCRED” dentro de IRAF. Dicho proceso incluye las correcciones por bias, flats, etc. y, posteriormente, tareas específicas para reducir cada mosaico a una imagen única. Además, se corrige por

efectos debidos a diferencias entre las características de los distintos CCDs, como la ganancia, el ruido de lectura, etc. A pesar de estos últimos procesos y, principalmente, debido al gran tamaño del campo de visión del MOSAIC, suelen subsistir pequeñas diferencias entre los puntos de cero en cada filtro para los distintos campos. Es necesario estimar tales diferencias a fin de obtener una fotometría homogénea de todo el conjunto y, por tal motivo, se obtuvieron los campos con una zona de superposición (ver Figura 2.1). Para más detalles sobre los primeros pasos de reducción, se sugiere consultar el primer trabajo en que se utilizaron las imágenes del campo central (Dirsch et al. 2003b).

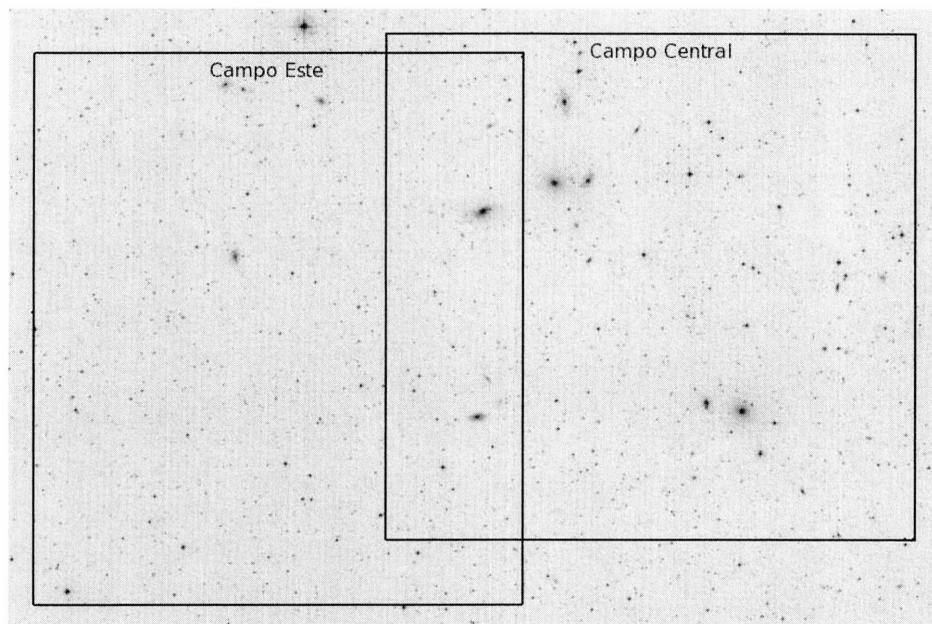


Figura 2.1: Ubicación de los dos campos obtenidos con MOSAIC sobre una combinación de imágenes del Palomar Observatory Sky Survey en el filtro rojo. El Norte se encuentra hacia arriba, y el Este hacia la izquierda.

2.2. Reducción de las imágenes

2.2.1. Selección preliminar de objetos puntuales y fotometría

A fin de identificar las candidatas a UCDs, el primer paso es seleccionar los objetos puntuales presentes en el campo. Para facilitar esta búsqueda es

necesario restar la luz de las galaxias, ya que pueden quedar objetos ocultos por el brillo de las mismas. Se utilizó un filtro de mediana anular, con radio interno 9" y un radio externo de 11" en ambos campos. Este filtrado ya ha sido aplicado a imágenes MOSAIC de Fornax en trabajos anteriores (por ej. Dirsch et al. 2003a, 2003b, Bassino et al. 2006a, 2006b), comprobándose que no afecta las magnitudes de los objetos puntuales.

Luego se hizo una primera selección de objetos puntuales con el software SExtractor (Bertin & Arnouts 1996), sobre las imágenes R , ya que estas poseen mejor relación señal/ruido que las imágenes C . Para realizar la detección de los objetos, SExtractor realiza un proceso de segmentación ("segmentation", en inglés), que consiste básicamente en identificar los objetos y separarlos de la señal de fondo. Cuando nos referimos a un objeto, SExtractor entiende por tal a un grupo de píxeles conectados que superan un cierto umbral por encima de la señal del cielo. Puesto que a la distancia del cúmulo de Antlia las UCDs se observarían en nuestras imágenes como objetos puntuales, escogimos que sea cinco el número mínimo de píxeles conectados que deben ser identificados como un objeto (parámetro de entrada DETECT_MINAREA).

Tras realizar varias pruebas modificando los valores de los parámetros, decidimos tomar como umbral de detección, 1.5 veces la desviación estándar de la señal del cielo (parámetro de entrada DETECT_THRESH). Debido al tamaño de las imágenes de mosaico, la señal del cielo puede presentar variaciones de pequeña escala, las cuales deberían ser tenidas en cuenta. Por esto escogimos que para la determinación del mapa de fondo se utilicen regiones de 32 píxeles de lado (parámetro de entrada BACK_SIZE).

Una de las principales ventajas de SExtractor es su capacidad de diferenciar entre fuentes puntuales y extendidas. Esto lo realiza analizando la fotometría de cada objeto a través de una red neuronal, que asigna a cada objeto un valor real. Dicho valor, denominado índice de estelaridad, se encontrará entre cero y uno, siendo este límite superior el correspondiente a un objeto puntual ideal. En nuestro caso, puesto que a partir de los parámetros resultantes de la fotometría PSF a realizar con DaoPhot/IRAF (Stetson 1987) realizaremos una segunda selección, nos limitaremos por ahora a descartar todos los objetos con índice de estelaridad menor a 0.4.

Tras esto se realizó la fotometría de los objetos puntuales seleccionados con el paquete DaoPhot/IRAF. Se utilizó una PSF ("Point Spread Function") variable en ambos campos. Dado el gran tamaño del campo MOSAIC, se procedió a seleccionar en cada filtro entre 100 y 150 candidatos a *estrellas PSF*, obteniendo en todos los casos una muestra de objetos puntuales brillantes distribuida en todo el campo, a fin de poder estimar apropiadamente la variabilidad local de la PSF que se utilizaría para realizar la fotometría.

Mediante la tarea PSF, perteneciente a DaoPhot/IRAF, se obtuvieron los parámetros de la distribución que mejor ajustaba el perfil de los objetos escogidos en las diversas muestras de *estrellas PSF*. A continuación se reproducen las expresiones analíticas de las distribuciones propuestas.

$$\text{gaussiana} = A e^{-\left(\frac{x^2}{2 p_1^2} + \frac{y^2}{2 p_2^2}\right)} \quad (2.1)$$

$$\text{lorentziana} = \frac{A}{1 + x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2 + x y p_3} \quad (2.2)$$

$$\text{moffat}_{15} = \frac{A}{(1 + x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2 + x y p_3)^{1.5}} \quad (2.3)$$

$$\text{moffat}_{25} = \frac{A}{(1 + x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2 + x y p_3)^{2.5}} \quad (2.4)$$

$$\text{penny}_1 = A \frac{1 - p_3}{1 + (x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2)} + p_3 e^{-0.693 (x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2 + x y p_4)} \quad (2.5)$$

$$\text{penny}_2 = A \frac{1 - p_3}{1 + (x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2 + x y p_5)} + p_3 e^{-0.693 (x^2/p_1^2 + y^2/p_2^2 + x y p_4)} \quad (2.6)$$

Tanto en los filtros R como C de ambos campos, los menores residuos se obtuvieron al utilizar una función Penny2, por lo que fue esta la distribución elegida para representar la PSF. Finalmente se obtuvo la fotometría mediante la tarea “ALLSTAR” de Daophot/IRAF.

2.2.2. Corrección de abertura y selección final de objetos puntuales

La corrección de abertura debe llevarse a cabo puesto que las estrellas que utilizaremos para obtener las ecuaciones de transformación al sistema estándar fueron medidas mediante fotometría de abertura con un radio distinto al utilizado en las imágenes de ciencia. En la calibración del campo central, las estrellas estándar fueron medidas con radio de abertura de 15 pixeles, en tanto que un radio de 30 pixeles fue usado en el caso del campo Este. Por otra parte, en todos los casos la fotometría de abertura de los objetos de ciencia (que luego es la base para la PSF) se realizó con un radio de 4 pixeles. Se debe, entonces, obtener una corrección a las magnitudes a fin de considerar el flujo luminoso que no es tenido en cuenta por las aberturas de menor radio.

Otro factor que, si bien es secundario, también debemos tener en cuenta, es que las magnitudes con que finalmente trabajaremos fueron obtenidas a

partir de fotometría PSF y, si bien el radio de ajuste se tomó también en 4 píxeles, podrían presentarse pequeñas diferencias respecto a las magnitudes obtenidas mediante fotometría de abertura.

A partir de las dos correcciones mencionadas en los párrafos precedentes, la magnitud resultante (MAG_{cor}) se obtiene de la expresión:

$$MAG_{cor} = MAG_{psf} + (MAG_4 - MAG_{psf}) + (MAG_{15} - MAG_4) \quad (2.7)$$

donde los respectivos subíndices refieren a la magnitud ajustada con la PSF, y a los tamaños de las aberturas. La abertura de 15 píxeles refiere al campo central y se cambia por la de 30 píxeles para el campo Este.

Las correcciones de abertura totales aplicadas a las magnitudes obtenidas en la fotometría PSF fueron, para el campo central, de -0.307 en el filtro C y de -0.215 en el filtro R , y para el campo Este, de -0.164 en el filtro C y de -0.154 en el filtro R .

Una vez aplicada la corrección de abertura, se realizó una segunda selección de objetos puntuales en función de los parámetros CHI y SHARPNESS calculados por la tarea "ALLSTAR". El primero es un estimador de la bondad del ajuste, determinado a partir de la razón entre la dispersión pixel a pixel de los residuos del ajuste, y la dispersión esperada. El gráfico de CHI en función de la magnitud para un grupo de objetos puntuales debería mostrar valores cercanos a la unidad, sin ninguna tendencia significativa, excepto quizás en el extremo brillante (debido a efectos de saturación).

En cambio, el parámetro SHARPNESS se define como la diferencia entre los cuadrados del ancho del objeto y del ancho de la PSF. De esta manera, presentará valores cercanos a cero para objetos puntuales, y de módulo grande en el resto de los casos; positivos para galaxias u objetos superpuestos que no puedan ser resueltos individualmente, y negativos en el caso de rayos cósmicos.

Puesto que las observaciones de ambos campos fueron realizadas en turnos de observación diferentes, al realizar esta última etapa de selección tuvimos especial cuidado en corroborar que los criterios aplicados en ambos campos fueran consistentes. Esto se realizó con el fin de evitar que el procesamiento manipulara ambas muestras e impidiera obtener resultados fidedignos a la hora de aplicar las correcciones por contaminación al campo central. Tras esto, el número de objetos puntuales en el campo central asciende a poco más de 8000.

2.2.3. Calibración al sistema estándar y corrección por enrojecimiento

Las ecuaciones de calibración al sistema estándar y la corrección por enrojecimiento correspondientes al campo central, ya fueron obtenidas por Dirsch et al. (2003b) por lo que se utilizarán las mismas. Para obtener la calibración al sistema estándar del campo Este, se realizó la fotometría de abertura de un conjunto de estrellas estándar situadas en campos dados por Geisler (1996). Dichos campos fueron obtenidos a lo largo de las dos noches de observación, con una amplia cobertura de valores de masa de aire. Mediante las tareas “MKNOBSFILE”, “MKCONFIG” y “FITPARAMS” del paquete PHOTCALX de IRAF, obtuvimos los coeficientes de las ecuaciones de transformación utilizadas. Se realizó el procedimiento para ambas noches por separado y, tras comprobar que los coeficientes no presentan diferencias apreciables que pudieran generar errores adicionales, conformamos con las observaciones de estrellas estándar de ambas noches una única lista de entrada y repetimos el cálculo de los coeficientes de las ecuaciones de transformación. Esta tarea fue realizada conjuntamente con el Sr. Juan Pablo Calderón, quien necesitaba estas ecuaciones para otros fines.

Al calibrar las magnitudes se procedió, además, a convertir las magnitudes del filtro R de Kron-Cousins en el T_1 , propio del sistema de Washington, y con el cual trabajaremos de aquí en más. La elección de este filtro para realizar las observaciones responde a que Geisler (1996) probó que el filtro R de Kron-Cousins es más eficiente en las observaciones que el filtro T_1 de Washington. Aún más, las magnitudes obtenidas con ambos filtros están fuertemente relacionadas, con una variación en el punto de cero para las estrellas estándar utilizadas en su trabajo de solo $R - T_1 = -0.02$. Esta es la corrección de punto de cero que aplicamos en ambos campos para obtener las magnitudes finales.

Teniendo en cuenta todo esto, las ecuaciones utilizadas para obtener las magnitudes C y T_1 en el sistema estándar fueron:

Campo central

$$(C - T_1) = (c - r) - 0.744 - 0.202 \times X_C + 0.088 \times (C - T_1) \quad (2.8)$$

$$T_1 = r + 0.705 - 0.07 \times X_R + 0.033 \times (C - T_1) \quad (2.9)$$

Campo Este

$$(C - T_1) = [(c - r) - 0.687 - (0.418 \times X_C - 0.14 \times X_R)]/0.908 \quad (2.10)$$

$$T_1 = r + 0.628 - 0.14 \times X_R + 0.019 \times (C - T_1) \quad (2.11)$$

donde las magnitudes en mayúscula corresponden al sistema estándar y las minúsculas al sistema instrumental. Las X representan las respectivas masas de aire.

Para corregir por enrojecimiento el campo central se utilizaron los valores indicados por Dirsch et al. (2003b). En ambos casos, las estimaciones se determinaron a partir de los mapas de Schlegel et al. (1998), realizando un promedio del $E(B - V)$ en varios puntos del campo, debido a la existencia de pequeñas variaciones. Para obtener el enrojecimiento en los filtros utilizados en esta tesis se consideró $E(C - T_1) = 1.97 \times E(B - V)$ (Harris & Canterna 1977). De esta forma, se determinaron enrojecimientos promedio para ambos campos, coincidiendo su valor en $E(C - T_1) = 0.19$. Para determinar la absorción en R se adoptaron $A_R = 0.75 \times A_V$ (Rieke & Lebofsky 1985).

Por último, resta considerar que pueden existir pequeñas diferencias en los puntos de cero de las magnitudes de ambos campos debido a las características del MOSAIC, como se explicó en la Sec. 2.1. Puesto que es de vital importancia que ambos campos sean coherentes entre sí a fin de calcular correctamente la influencia de la contaminación, hicimos una búsqueda de todos aquellos objetos puntuales presentes en ambos campos, y estimamos las diferencias de magnitudes promedio en C y en T_1 en el sistema estándar, entre el campo Este y el campo central. Las diferencias obtenidas fueron: $\delta R = 0.12$ mag y $\delta C = 0.06$ mag, en base a 277 objetos. Una vez aplicadas estas diferencias en puntos de cero como factor de corrección a todos los objetos del campo de comparación, obtenemos finalmente magnitudes coherentes entre ambos campos.

2.3. Construcción de las muestras

2.3.1. Selección por color y magnitud

A fin de seleccionar los candidatos a UCDs y a CGs entre todos los objetos puntuales, adoptamos rangos de brillo y color según se explica a continuación. Teniendo en cuenta que las UCDs poseerían brillos intrínsecos en el rango

$-13.5 < M_V < -11$ mag, propuesto por Hilker (2009), considerando que el módulo de distancia de Antlia es $(m - M) \approx 32.7$ (Dirsch et al. 2003b), y si aceptamos que la diferencia entre magnitudes V y R para galaxias E dada por Fukugita et al. (1995), i.e. $V - R = 0.6$, es válida para las UCDs, entonces las candidatas a UCDs de Antlia poseerían magnitudes entre $18.6 < T_1 < 21.1$. Para seleccionar los candidatos a CGs en ambos campos, adoptamos aquellos con color en el rango $0.8 < (C - T_1) < 2.3$ (por ej. Dirsch et al. 2003b, Bassino et al. 2006a,b), y magnitudes más débiles que las candidatas a UCDs, i.e. $T_1 > 21.1$. Finalmente, para escoger la muestra de candidatas a UCDs se consideró el rango de magnitudes mencionado anteriormente, y colores entre $1.0 < (C - T_1) < 2.3$. El rango de color adoptado se debe a que a las UCDs se les asigna un intervalo de colores similar al de los CGs, salvo el límite azul que es levemente diferente debido a que no se encuentran en la literatura UCDs confirmadas más azules que $(C - T_1) = 1.0$.

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama color-magnitud (DCM) de los objetos puntuales del campo central, y en la Figura 2.3 el correspondiente al campo Este. El recuadro negro indica la región del diagrama que ocupan las candidatas a UCDs. Al comparar ambos gráficos notamos de inmediato que las regiones ocupadas tanto por las galaxias compactas azules de fondo (abultamiento de objetos débiles entre $0 < (C - T_1) < 0.8$), como por las estrellas de la Vía Láctea más rojas que los CGs ($C - T_1 > 2.8$ aproximadamente) son similares. Sin embargo, en la región donde se espera hallar las UCDs y los CGs hay una clara disminución en el número de objetos presentes en el campo E. Es interesante señalar la escasez de objetos en el rango de colores de las candidatas a UCDs, y con magnitudes $18.6 < T_1 < 19.5$, que se observa en el campo de comparación. A medida que avancemos en el trabajo intentaremos ahondar en este punto, buscando discernir si existe alguna causa física detrás de dicho comportamiento.

2.3.2. Campo de comparación

Para escoger la región a utilizar en el cálculo de la contaminación, consideramos conveniente evitar las proximidades de galaxias, particularmente de las dos galaxias dominantes del cúmulo. Por esto, y teniendo en cuenta la distribución espacial proyectada de objetos puntuales, decidimos adoptar como campo de comparación la zona del campo Este limitada en la Figura 2.4 por el recuadro en líneas continuas delgadas. A poco más de $27'$ de NGC 3268, la región tiene una superficie de unos 468 minutos de arco cuadrados. Las dimensiones de esta región permiten reducir considerablemente el efecto de cualquier posible variación de pequeña escala en la densidad de objetos. Respecto de trabajos anteriores realizados sobre los objetos compactos

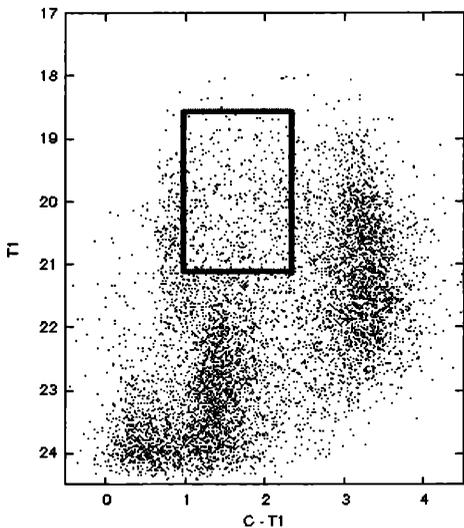


Figura 2.2: DCM de objetos puntuales ubicados en el campo central. El recuadro indica la ubicación de las candidatas a UCDs.

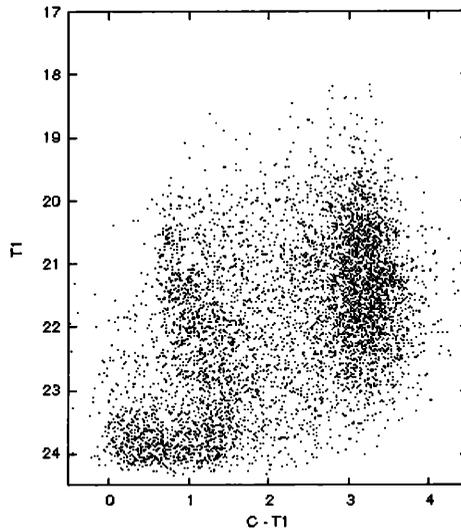


Figura 2.3: DCM de objetos puntuales ubicados en el campo Este.

de la región central de Antlia (Dirsch et al. 2003b, por ej.), la posibilidad de contar con este campo podría constituirse en una importante mejora, dada su mayor distancia (proyectada) de las galaxias centrales, evitando así una sobreestimación de la contaminación.

Al analizar la distribución espacial proyectada de objetos puntuales en la región escogida como campo de comparación, en los rangos de color y brillo característicos tanto de CGs como de UCDs, no distinguimos que los objetos siguieran alguna distribución en particular. Esto es fundamental para considerar que hemos obtenido una buena estimación de la contaminación de fondo.

2.3.3. Extensión radial proyectada

Los objetivos de esta Tesis, aparte de la identificación de candidatas a UCDs, abarcan su comparación tanto con los sistemas de CGs de las galaxias dominantes de Antlia como con la población de galaxias enanas, a partir de resultados propios o publicados por otros autores. Por lo tanto, es importante determinar la extensión angular de los sistemas de CGs respecto de cada galaxia, a fin de poder limitar las muestras de UCDs y CGs en la región analizada, lo cual facilitará la comparación de ambos grupos. A pesar de que

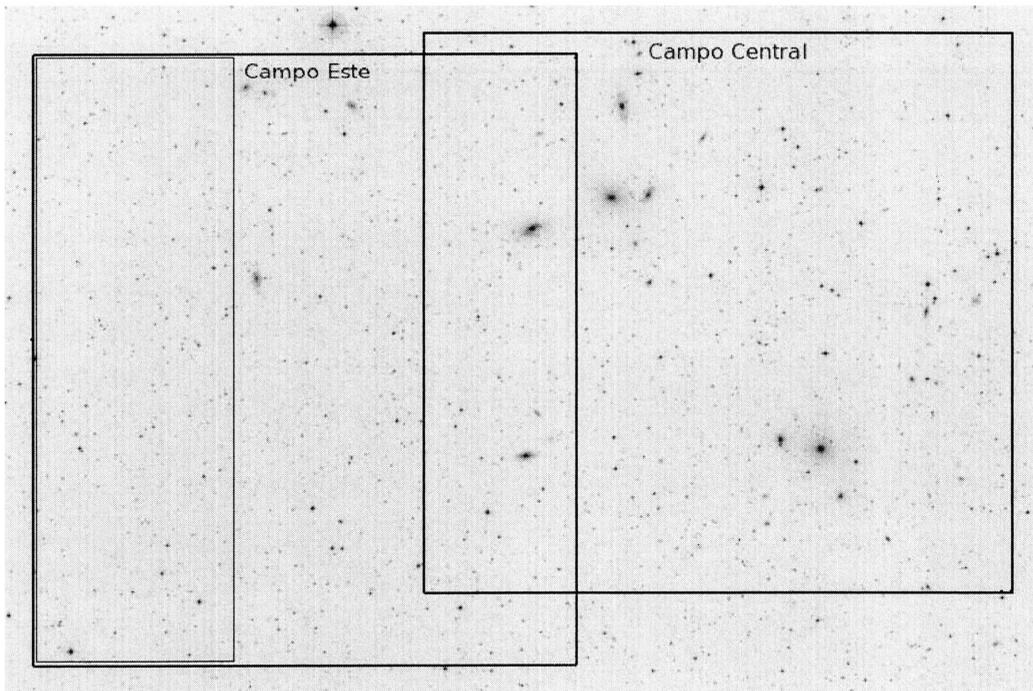


Figura 2.4: Ubicación del campo de comparación sobre una combinación de imágenes del POSS en el filtro rojo. El Norte se encuentra hacia arriba, y el Este hacia la izquierda. El campo escogido para determinar la contaminación de fondo está recuadrado por líneas continuas delgadas.

los CGs ya fueron estudiados en el campo MOSAIC central de Antlia por Dirsch et al. (2003b), vale la pena volver a determinar la extensión radial de la distribución proyectada de CGs al disponer ahora de un campo de comparación más apropiado, como se mencionó previamente.

La Figura 2.5 muestra la distribución radial proyectada de candidatos a CGs en torno a NGC 3258 (panel superior) y NGC 3268 (panel inferior), corregida por contaminación de fondo, y en el rango de radios galactocéntricos $1' < R < 10'8$. El límite superior de R corresponde aproximadamente a la mitad de la distancia angular entre ambas galaxias dominantes. A partir de la inspección visual de ambos paneles es claro que el sistema de CGs en ambos casos se extendería más allá de este rango de valores, pudiendo incluso superponerse ambos sistemas, algo que ya fue propuesto por Bassino et al. (2008). Teniendo en cuenta esto, si se aplica un corte menor en la máxima distancia galactocéntrica adoptada para estudiar los objetos puntuales, se estará sesgando la muestra. Por otra parte, dado que la densidad proyectada de CGs es muy pequeña en $R \approx 10'8$ (ver Figura 2.5), y para evitar las

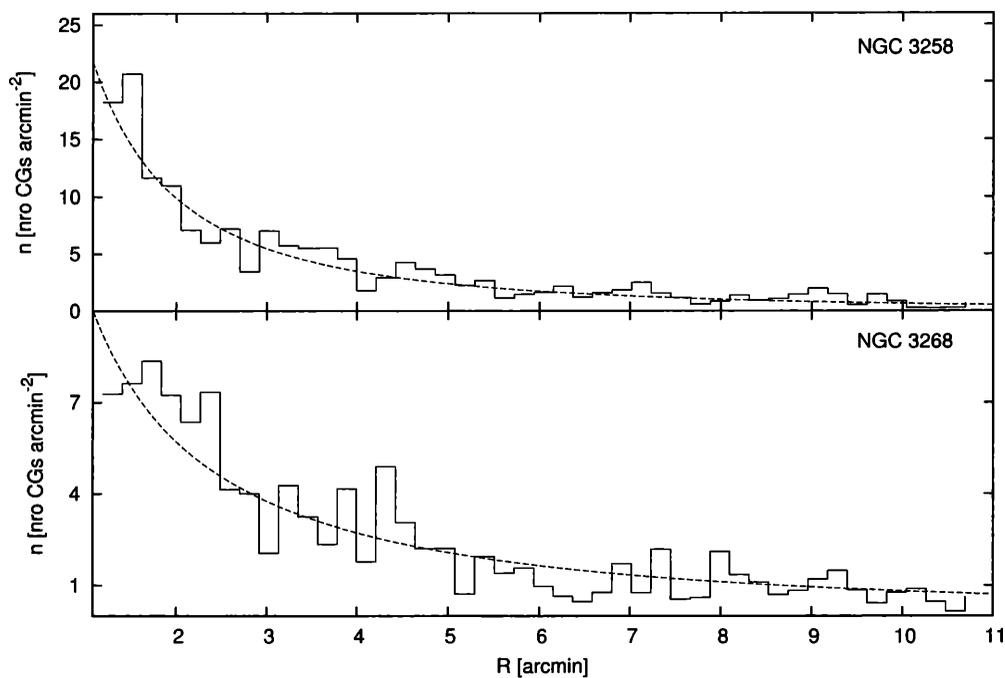


Figura 2.5: Distribuciones radiales proyectadas de candidatos a CGs en torno a NGC 3258 y NGC 3268, corregidas por contaminación de fondo. Las curvas punteadas en ambos gráficos indican sendos ajustes de un perfil de de Vaucouleurs.

complicaciones que acarrearía intentar distinguir las componentes de cada sistema si adoptáramos radios galactocéntricos mayores, debido a la compleja estructura de los sistemas de CGs descrita en trabajos previos (Dirsch et al. 2003b, Bassino et al. 2008), es que restringiremos nuestro análisis a todos aquellos candidatos a CGs y candidatas a UCDs situados a menos de $10''$ de cada una de las dos galaxias dominantes del cúmulo.

Capítulo 3

Distribución espacial proyectada

En la Figura 3.1 se muestra la distribución espacial proyectada de las candidatas a UCDs en el campo central de Antlia. Es evidente que la mayor cantidad de objetos se encuentra en los alrededores de NGC 3268, una de las dos galaxias E dominantes. Se ha tomado como color límite para diferenciar candidatas a UCDs y a CGs, azules y rojos, $(C - T_1) \approx 1.5$, siguiendo trabajos previos sobre CGs con fotometría en el sistema de Washington (por ej., Dirsch et al. 2003a, Bassino et al. 2006b). Cabe aclarar que dicha separación entre objetos azules y rojos es estimativa, pues hay un rango de color donde ambas distribuciones se superponen, particularmente en los CGs (por ej. Forte et al. 2007, 2009). Utilizaremos este límite para estudiar en forma estadística diferencias entre ambos grupos.

Si consideramos todos los objetos situados a menos de 10'8 minutos de arco de cada una de las dos galaxias encontramos, sin corrección por contaminación mediante, que las candidatas a UCDs *azules* en torno a NGC 3258 suman unas 38, en tanto en las cercanías de NGC 3268 se observan unos 46 objetos. Esta diferencia entre ambas “poblaciones” es aún más notoria en el caso de las *rojas*, de las cuales encontramos 45 candidatas en los alrededores de NGC 3258 y 88 en los alrededores de NGC 3268, lo que representa cerca de un 96 % más. Cabe aclarar que nos referiremos a “poblaciones” de candidatas a UCDs *azul* y *roja*, sólo para enfatizar que corresponden a los mismos rangos de color que las respectivas poblaciones de CGs, pero no existen evidencias claras de que existan diferencias físicas entre ambas, lo que sí sucede en los CGs (por ej. sus distintas dispersiones de velocidades, Schubert et al. 2010).

Es interesante contrastar estas proporciones con la estructura del cúmulo de Antlia descrita en trabajos previos. La estructura del cúmulo de Antlia

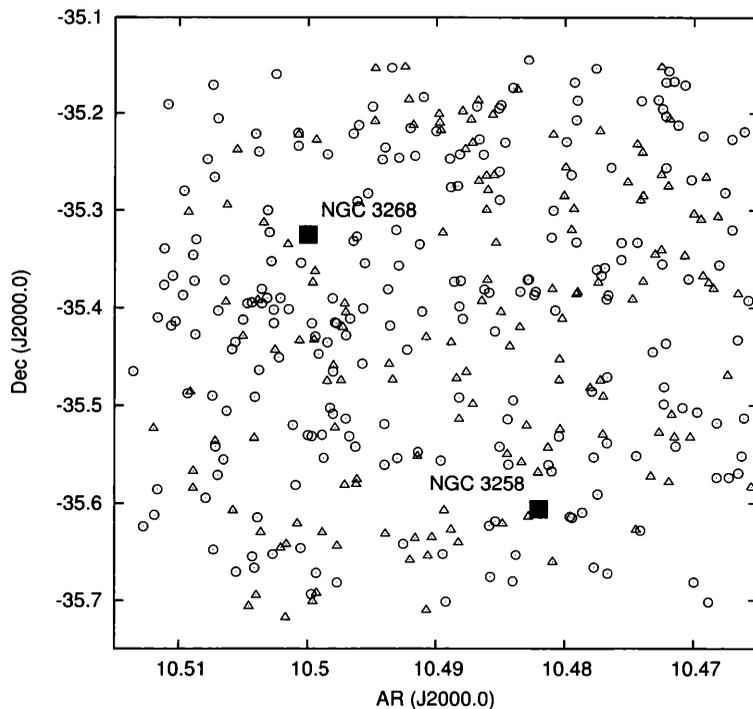


Figura 3.1: Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo MOSAIC central de Antlia. Las candidatas a UCDs *azules* están indicadas con triángulos, y las candidatas *rojas* con círculos. Los cuadrados llenos identifican las dos galaxias dominantes.

pareciera constar de dos agrupaciones dominadas por las galaxias E gigantes NGC 3258 y NGC 3268. Dado el número de galaxias observadas en torno a cada una de ellas, se encuentra que la primera agrupación podría tratarse de un “grupo”, mientras que la segunda parecería definir un sistema más numeroso (Smith Castelli 2008). En este sentido, la proporción de candidatas a UCDs mantendría cierta similitud con la de las galaxias. Si, en cambio, proponemos una analogía con los sistemas de CGs de ambas galaxias dominantes, encontramos claras diferencias. De nuestro análisis de los objetos puntuales en la región central del cúmulo, encontramos que el sistema asociado a NGC 3258 es el más numeroso, lo cual se evidencia en las distribuciones radiales de CGs para ambas galaxias (Figura 2.5). Tal resultado está en acuerdo con los obtenidos por Dirsch et al.(2003b) y Bassino et al. (2008), que estudiaron los sistemas de CGs asociados a ambas galaxias dominantes en base a datos de MOSAIC y de VLT, respectivamente.

Como hemos mencionado en la introducción de la presente Tesis, Dirsch et al. (2003b) muestran que la frecuencia específica de CGs de NGC 3268

se encuentra en el rango usual de galaxias E, mientras que en el caso de NGC 3258 es comparable con las frecuencias específicas propias de galaxias E masivas ubicadas en el centro de cúmulos de galaxias. Posteriormente, estos resultados fueron corroborados por Bassino et al. (2008). Esto indicaría que la proporción de candidatas a UCDs en torno a cada galaxia dominante se encuentra más en acuerdo con la distribución de las galaxias que con la de CGs.

En ambos casos, se observa de la Fig. 3.1 que la población *roja* de candidatas a UCDs parecería estar más concentrada en torno a las galaxias que la *azul*, lo cual es consistente con el comportamiento descrito en la literatura para las dos poblaciones de CGs (Brodie & Strader 2006, por ej.). También podemos destacar que es escasa la cantidad de candidatas que se encuentran a menos de 3' de NGC 3258, y en el caso de NGC 3268 esta cifra aumenta hasta 5'. En este caso, se debe tener en cuenta que el efecto de incompletitud causado por el brillo de las galaxias no afecta a más de 1' de sus centros, como se ha mostrado en los trabajos previos sobre CGs.

Antes de realizar un análisis más minucioso, considerando correcciones por contaminación de fondo, vamos a ver cualitativamente si existe alguna variación en la concentración de las candidatas a UCDs respecto a las dos galaxias dominantes. Esto es lo que se intenta averiguar mediante la Figura 3.2. En la misma se grafica el porcentaje de candidatas más brillantes que la magnitud considerada, ubicadas a menos de 10'8 de cada una de las dos galaxias dominantes, con respecto al total de objetos puntuales detectados en el mosaico con idéntico límite en magnitud. En el extremo brillante, cuando los objetos tenidos en cuenta en el cálculo son escasos, la curva es claramente ruidosa, como es de esperar. Luego, los valores se estabilizan en torno al 70 %, hasta una magnitud límite que hemos identificado como $T_1 = 19.65$. A partir de allí, el porcentaje de concentración cae notoriamente, tras lo cual los valores vuelven a estabilizarse, en alrededor de un 55 % a 60 %, hasta la magnitud límite más débil que se ha adoptado para la selección. Si bien este análisis no es cuantitativamente preciso, nos permite discernir la existencia de un cambio en el comportamiento de la población.

En base a este último resultado, discriminaremos la muestra de candidatas a UCDs entre aquellos objetos débiles ($19.65 < T_1 < 21.1$) y brillantes ($T_1 < 19.65$), con el objetivo de intentar determinar si efectivamente existen diferencias entre ambos grupos, que puedan interpretarse como resultado de algún proceso físico. Continuando este análisis, en las Figuras 3.3 y 3.4 se exponen las distribuciones espaciales proyectadas de las submuestras *brillante* y *débil* de candidatas a UCDs, respectivamente.

La distribución espacial proyectada de candidatas débiles (Fig. 3.3) muestra una gran dispersión de objetos, lo cual podría ser indicativo del alto nivel

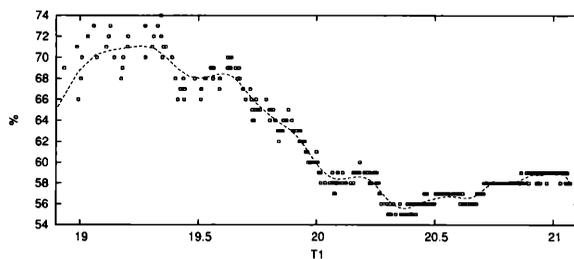


Figura 3.2: Porcentaje de candidatas a UCDs más brillantes que la magnitud considerada (dada en el eje de abscisas), situados en los alrededores de las dos galaxias dominantes.

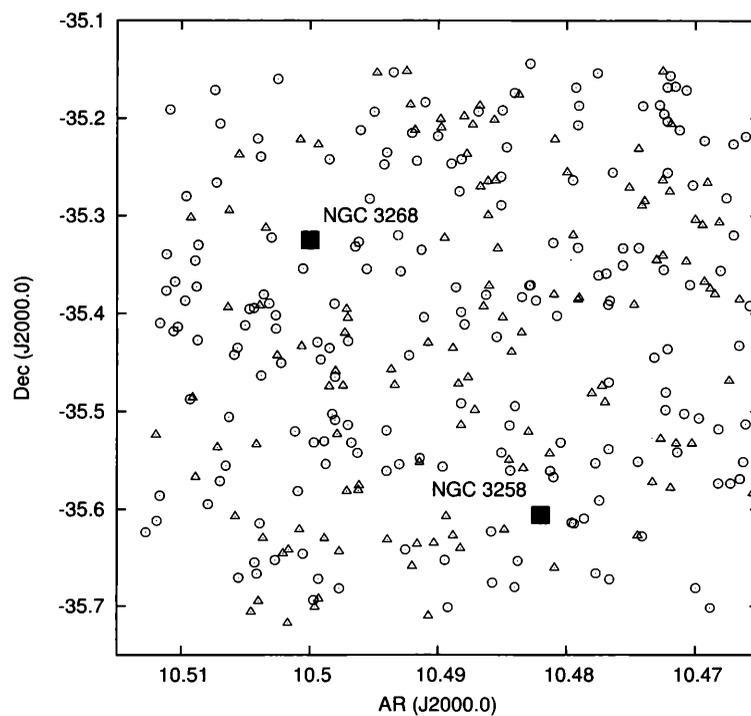


Figura 3.3: Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo central de Antlia con $19.65 < T_1 < 21.1$. Símbolos como en la Fig. 3.1

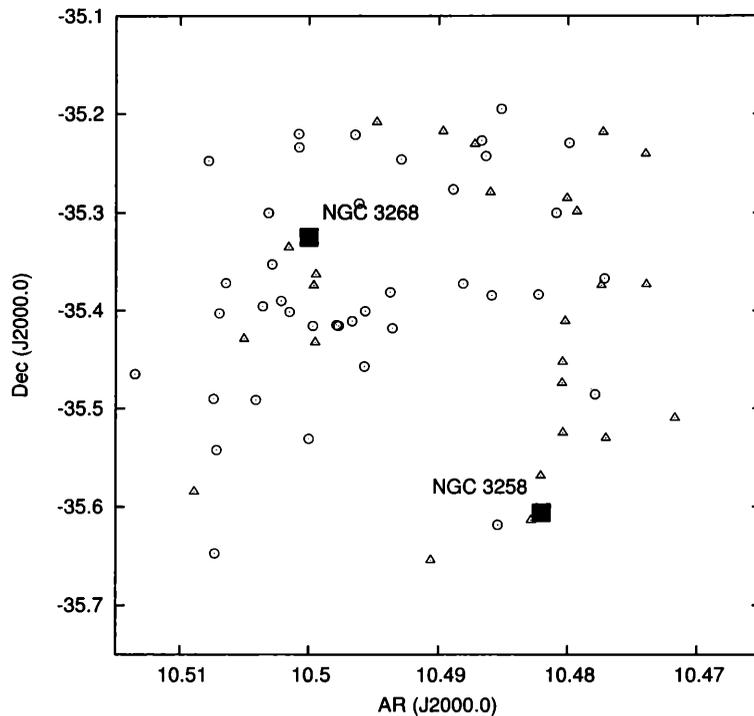


Figura 3.4: Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo central de MOSAIC con $18.6 < T_1 < 19.65$. Símbolos como en la Fig. 3.1

de contaminación de fondo al cual se estaría expuesto. A simple vista, en las cercanías de NGC 3268 el mayor número de objetos parece pertenecer a la población *roja*, observándose una situación similar en NGC 3258. En los alrededores de ambas galaxias el número de candidatas podría disminuir, en torno a cada galaxia, en la dirección opuesta a la que se ubica su compañera. Este fenómeno aparenta ser más notorio en el caso de NGC 3268, debido al considerable tamaño de la muestra.

En cambio, la distribución espacial proyectada de candidatas brillantes (Fig. 3.4) muestra una mayor concentración hacia la galaxia NGC 3268. En los alrededores de esta se encuentra el mayor número de objetos, destacándose la gran cantidad de candidatas a UCDs *rojas* aglomeradas en una sección de anillo centrada en NGC 3268. Dicha disposición se extiende, desde $\alpha \approx 10.5$ horas y $\delta \approx -35.4$, hasta $\alpha \approx 10.49$ horas y $\delta \approx -35.4$. Es interesante que prácticamente la totalidad de los objetos que se ubican sobre ese anillo, lo hacen en la región más próxima del mismo a NGC 3258. Esto podría ser un indicador de procesos de interacción entre ambas galaxias, los que modificarían todo el sistema, y en particular a la muestra señalada. Sin embargo,

es necesario aclarar que la información recogida hasta el momento es insuficiente para poder confirmar tal hipótesis.

En la Tabla 3.1 se distinguieron las candidatas a UCDs según su magnitud, generando cuatro grupos que, tras corregir por contaminación de fondo, contuvieran igual cantidad de objetos. Para las candidatas a UCDs en torno a cada galaxia (separadas en *rojas* y *azules*), se indica el porcentaje de objetos que representan respecto al número total observado en el mosaico en ese intervalo de magnitud (columnas identificadas con %), y el número de objetos al que dicho porcentaje corresponde (columnas identificadas con *Cantidad*). Todas las cantidades indicadas en la tabla fueron obtenidas tras corregir por contaminación.

En ambas galaxias se observan evidencias de candidatas a UCDs tanto *rojas* como *azules* en distintos rangos de brillo. La presencia de ambos grupos es más clara para los objetos cercanos a NGC 3268; las candidatas en torno a NGC 3258, menos numerosas, presentan porcentajes con una variabilidad más pronunciada. En la fila indicada como *Subtotal* se reproducen los resultados de considerar los primeros tres intervalos como una única muestra. Para los objetos en torno a ambas galaxias vemos que las candidatas *rojas* constituyen el grupo más numeroso. En el intervalo más brillante, vemos que no sobreviven candidatas a UCDs *rojas* alrededor de NGC 3258, algo previsible dada la escasa cantidad de objetos observados (Fig. 3.4). Un porcentaje elevado de los objetos *rojos* se encuentran en las inmediaciones de NGC 3268, mientras que más del 90% de los *azules* se halla a menos de 10'8 de alguna de las dos galaxias. Estos resultados guardan poca relación con aquellos listados en la fila *Subtotal*, corroborando los resultados cualitativos que fueron derivados previamente de la Figura 3.2.

Tabla 3.1: Número de candidatas a UCDs, en torno a cada galaxia dominante, discriminadas por color y magnitud tras corregir por contaminación. Las columnas % indican el porcentaje de objetos respecto del número total observado en el mosaico.

T_1	NGC 3258				NGC 3268			
	$1.0 < (C - T_1) < 1.5$ %	$1.0 < (C - T_1) < 2.3$ %	$1.5 < (C - T_1) < 2.3$ %	$1.5 < (C - T_1) < 2.3$ %	$1.0 < (C - T_1) < 1.5$ %	$1.0 < (C - T_1) < 2.3$ %	$1.5 < (C - T_1) < 2.3$ %	$1.5 < (C - T_1) < 2.3$ %
21.10 - 20.49	34	4.8	52	14	40	5.8	48	13
20.49 - 19.89	10	1	0	0	58	5	47	16
19.89 - 19.61	25	3.2	21	6	49	6.2	35	10
Subtotal	25	9	23	20	48	17	44	39
19.61 - 18.60	48	4.9	0.	0.	48	4.9	70	22

Aclaración.- Los incisos donde el número de objetos es cero implican que estos no perduran tras corregir por contaminación. La fila **Subtotal** corresponde al conjunto de UCDs *débiles*, englobando los tres primeros intervalos.

Aún resta comparar la distribución espacial proyectada de las candidatas a UCDs, y particularmente las más brillantes, con la de las galaxias dE,N situadas en el campo central de Antlia. Esto se muestra en la Figura 3.5, donde se identifican las candidatas a UCDs brillantes *rojas* (cuadrados vacíos), las candidatas brillantes *azules* (círculos), y las galaxias dE,N (triángulos llenos para aquellas cuya pertenencia al cúmulo está confirmada, y triángulos vacíos para las que aún no se han estimado velocidades radiales) estudiadas por Smith Castelli et al. (2008a). Para el rango de luminosidades considerado, hemos localizado en el campo central 39 candidatas *rojas* y 25 candidatas *azules*. Basándonos en las estimaciones de contaminación obtenidas en el campo de comparación, para una región de las dimensiones del campo central se esperarían 13 objetos *azules* y 3 objetos *rojos*. Al confrontar ambas muestras en el diagrama, considerando que la muestra de galaxias dE,N asciende a 13 miembros confirmados y 12 miembros sin confirmar, las candidatas a UCDs conforman un grupo más numeroso, aún aplicando las correcciones por contaminación correspondientes.

Esto podría llevar a considerar que núcleos de galaxias dE,N desmembradas por el potencial de las galaxias dominantes probablemente no alcancen para explicar la presencia de todas las UCDs, y otras explicaciones alternativas deben ser consideradas. También se observa que las galaxias se encuentran claramente agrupadas en torno de NGC 3268 y NGC 3258. Si bien esto también sucede para las candidatas a UCDs, se observan algunas de ellas ubicadas a una distancia proyectada considerable respecto de ambas galaxias, en el cuadrante noroeste del mosaico.

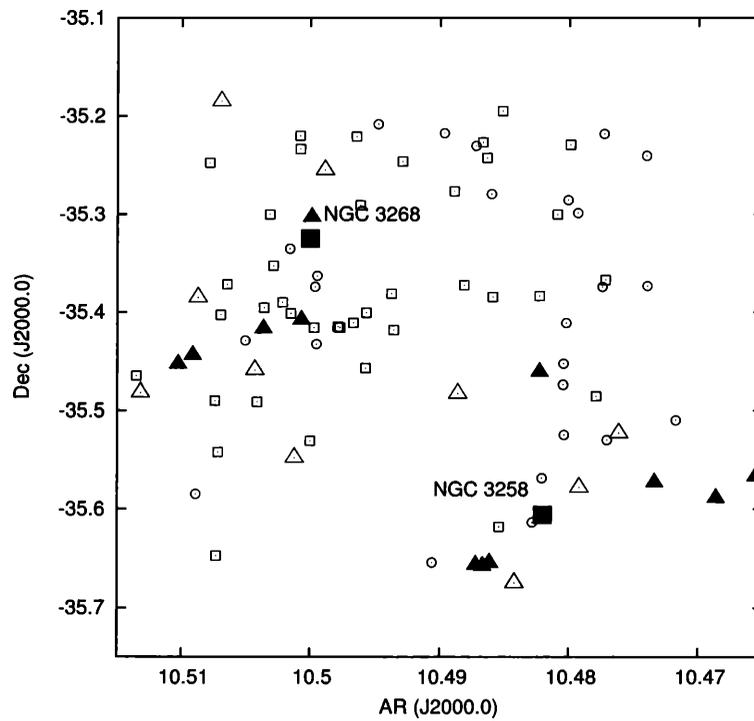


Figura 3.5: Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs ubicadas en el campo central de Antlia con $18.6 < T_1 < 19.65$, y galaxias dE,N. Las candidatas a UCDs brillantes *rojas* están indicadas con cuadrados vacíos, las candidatas brillantes *azules* con círculos, y las galaxias dE,N con triángulos (llenos para aquellas cuya pertenencia al cúmulo está confirmada, vacíos para las no confirmadas).

Capítulo 4

Colores y magnitudes

4.1. Distribución de color

En la Figura 4.1 se observan las distribuciones de color para los sistemas de CGs de ambas galaxias, previa sustracción de la contaminación de fondo estimada para cada intervalo de color, dentro del rango de brillo correspondiente a los CGs. Los paneles inferiores en cada gráfico muestran la corrección por contaminación de fondo aplicada. En todos los casos, los intervalos en $(C - T_1)$ utilizados corresponden a 0.10 mag, y el eje de las ordenadas expresa la densidad numérica proyectada por minuto de arco cuadrado. En ambos sistemas la población de candidatos a CGs azules es dominante, alcanzando valores de densidad mayores en NGC 3258, debido a la mayor cantidad de CGs que podrían estar asociados a la galaxia. Similar resultado se aprecia en el trabajo de Dirsch et al. (2003b), pese a que la escala de valores es diferente, debido a que en el presente trabajo se ha escogido un radio galactocéntrico superior como límite de los respectivos sistemas de CGs, y se ha tomado un campo más alejado para estimar la contaminación de fondo.

Las Figuras 4.2 y 4.3 corresponden a las distribuciones de color de las candidatas a UCDs con $T_1 < 19.65$. Debido al reducido tamaño de todas las muestras de candidatas a UCDs, el eje de las ordenadas se expresa directamente en cantidad de objetos hallados en las regiones consideradas. En este caso corresponden a un área de unos 366 minutos de arco cuadrados, abarcando a todos aquellos objetos a menos de $10'8$ de la galaxia correspondiente. Debido a que el campo de comparación tiene un área superior, al normalizar las correcciones por contaminación en base a la razón de áreas y aplicarlas posteriormente a las distribuciones, se obtienen valores racionales en las ordenadas.

En ambas Figuras, la distribución de color en el rango $1.0 < (C - T_1) < 1.4$

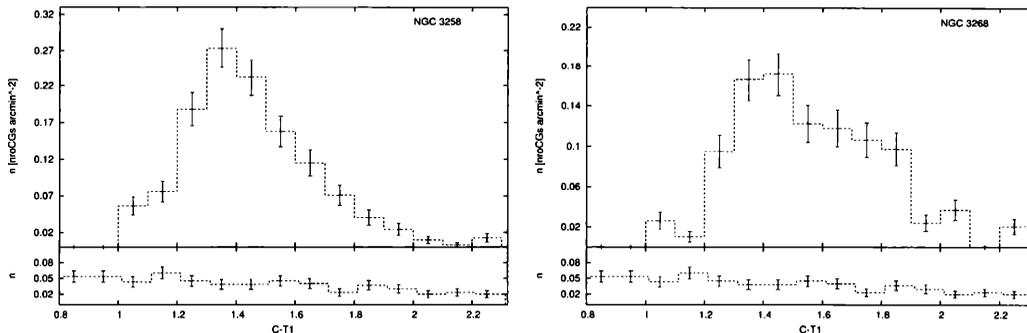


Figura 4.1: Distribución de color de los sistemas de candidatos a CGs de ambas galaxias. El panel inferior, en ambos casos, representa la distribución de color del campo de comparación.

presenta similitudes, con un escaso número de objetos y un nivel de contaminación que en proporción es importante. Sin embargo, en los intervalos con $(C - T_1)$ más rojos se aprecian comportamientos claramente disímiles. La distribución de color del campo de comparación refleja un marcado descenso a partir de esos valores. Mientras la distribución de NGC 3258 presenta escasos objetos, la de NGC 3268 muestra un número elevado de candidatas dado el tamaño de la muestra. El escaso número de objetos detectados en estos rangos de brillo y color en la muestra de contaminación, junto con la distribución espacial que presentan en torno a NGC 3268, refuerzan la posibilidad de que realmente sean objetos asociados al cúmulo de Antlia.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran las distribuciones de color de las candidatas a UCDs *débiles* (con $T_1 > 19.65$) y la distribución de color para los candidatos a CGs en las cercanías de NGC 3258 y NGC 3268, respectivamente, tras aplicar en todos los casos las correcciones por contaminación correspondientes. En ambos casos, las distribuciones de color de las candidatas a UCDs (paneles de la izquierda) presentan una clara distribución bimodal, lo cual no era evidente en las distribuciones de las muestras *brillantes*.

El intervalo que contiene el máximo para las candidatas a UCDs *azules* en torno a NGC 3258 (Figura 4.4), alcanza un número de objetos superior que el correspondiente a las *rojas*; estas últimas están mucho menos concentradas en torno a su moda. El panel de la derecha en dicha Figura muestra las distribuciones de color para los candidatos a CGs en dos intervalos de magnitud distintos. No se tuvieron en cuenta candidatos a CGs con $T_1 > 23.3$, debido a que para estos la incompletitud podría llegar a ser importante, tal como se observa en el DCM de la Figura 2.2.

En el panel de la derecha, la curva a trazos grafica la distribución de

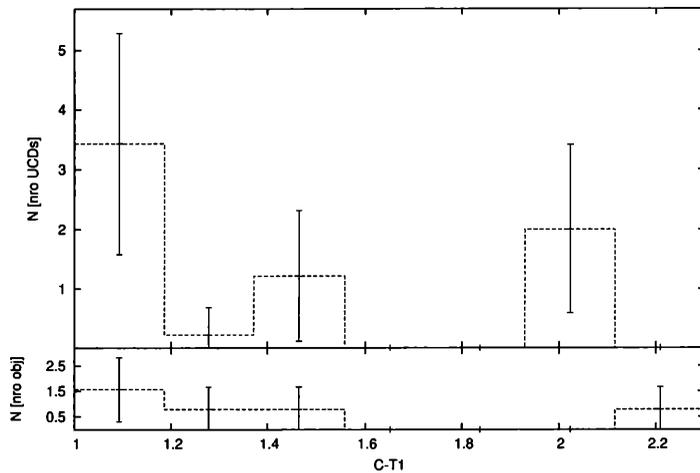


Figura 4.2: Distribución de color de las candidatas a UCDs brillantes cercanas a NGC 3258. El panel superior muestra la distribución corregida por contaminación y el inferior, la distribución de la contaminación.

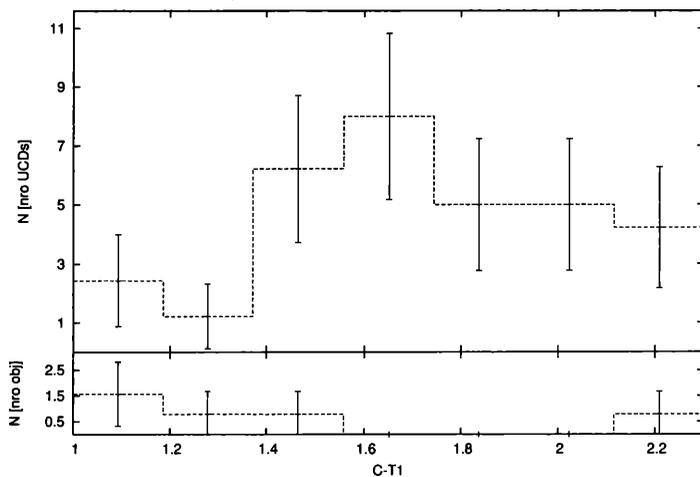


Figura 4.3: Distribución de color de las candidatas a UCDs brillantes cercanas a NGC 3268. El panel superior muestra la distribución corregida por contaminación y el inferior, la distribución de la contaminación.

aquellos objetos con $22.2 < T_1 < 23.3$, en tanto la curva continua se refiere al intervalo de candidatos a CGs más brillantes. La normalización aplicada implica que cada distribución fue multiplicada por la inversa del área encerrada bajo la curva. En ambas distribuciones los candidatos a CGs azules parecen ser mucho más numerosos, aunque la presencia de los candidatos

rojos es más evidente en el intervalo más brillante. El máximo de los objetos azules se desplaza hacia valores de $(C - T_1)$ mayores respecto al intervalo de candidatos más débiles. Esto es consistente con los resultados de Harris et al. (2006), quienes encontraron que tanto los CGs de NGC 3258 como los de NGC 3268 presentarían “blue tilt”. Este término se refiere a la tendencia a que el color promedio de CGs azules aumente conforme uno se desplaza hacia magnitudes más brillantes.

Al comparar la ubicación aparente de los máximos azules y rojos, tanto de la muestra de candidatas a UCDs débiles como de la muestra de candidatas a CGs brillantes, encontramos que podrían diferir, aunque la escasa resolución en color de la distribución de UCDs relativiza cualquier conclusión.

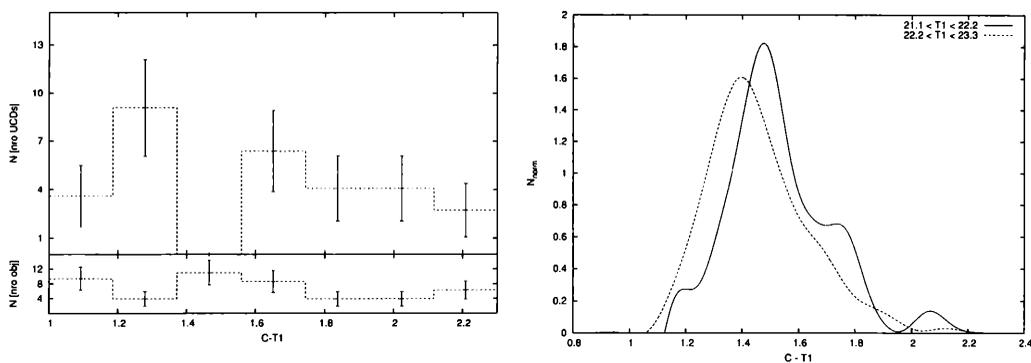


Figura 4.4: Distribución de color de los candidatos a CGs (der.) y UCDs *débiles* (izq.) cercanos a NGC 3258. Los candidatos a CGs fueron diferenciados en dos intervalos de magnitud y sus distribuciones, normalizadas.

En la Figura 4.5, como acabamos de mencionar, se muestran gráficos análogos para los objetos en los alrededores de NGC 3268. Para las candidatas a UCDs encontramos que el número de objetos con valores de $(C - T_1) > 2$, es muy superior a lo observado en los gráficos precedentes. El máximo azul de los candidatos a CGs con $21.1 < T_1 < 22.2$, al igual que para los objetos cercanos a NGC 3258, se ubica en valores de $(C - T_1)$ mayores que el intervalo del histograma de UCDs que presenta un mayor número de objetos azules. La evolución de la distribución de color de los candidatos a CGs muestra, nuevamente, que el máximo de candidatos azules se desplaza a valores de $(C - T_1)$ mayores en el intervalo más brillante. A diferencia de lo observado en las cercanías de NGC 3258, la proporción de candidatos rojos es similar a la de azules; esto tiene su contraparte en las candidatas a UCDs débiles *rojas*, encontrándose que son más numerosas en NGC 3268. Trabajos previos que abordaron el análisis de los sistemas de CGs de estas dos galaxias (Bassino et al. 2008), también indican que NGC 3268 presenta una mayor fracción

de candidatos a CGs rojos que NGC 3258. Estos autores también determinan colores medios para cada submuestra, obteniendo que los candidatos de NGC 3268 presentan un valor medio más rojo que los de NGC 3258. Para los objetos rojos, la diferencia entre los valores medios en una y otra galaxia se encuentran dentro del error de las estimaciones, no así para los azules. Sin embargo, debemos tener en cuenta que en dicho trabajo consideraron un límite superior de radio galactocéntrico proyectado menor que el utilizado en esta tesis.

En ambas galaxias, se observa que la distribución de color de los candidatos a CGs en el intervalo más luminoso alcanza valores de $(C - T_1)$ mayores, y los candidatos a CGs con $0.8 < (C - T_1) < 1.1$ son escasos. Esto es interesante, considerando el hecho mencionado al construir las muestras (Sección 2.3.1) de que en la literatura no figuran UCDs confirmadas con colores $(C - T_1) < 1$, marcando una posible continuidad en las distribuciones.

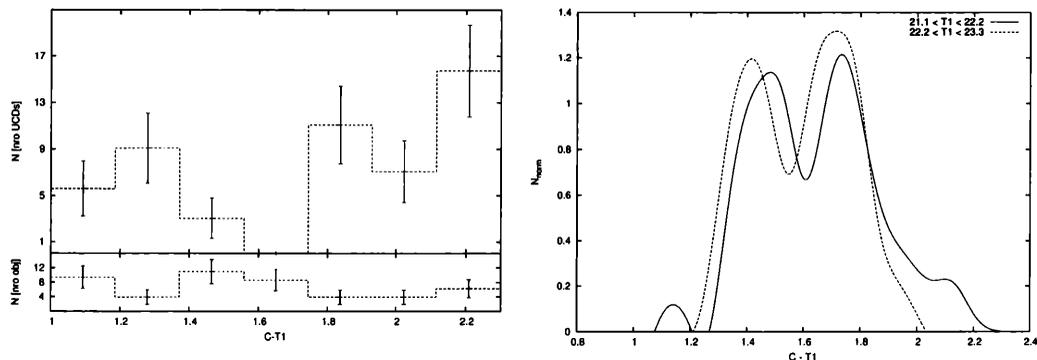


Figura 4.5: Distribución de color de los candidatos a CGs (der.) y UCDs *débiles* (izq.) cercanos a NGC 3268. Los candidatos a CGs fueron diferenciados en dos intervalos de magnitud y sus distribuciones, normalizadas.

Resulta interesante intentar corroborar la correlación entre porcentaje de CGs azules y rojos con la magnitud, vista en las Figuras 4.4 y 4.5, y averiguar si aquella mantenía algún tipo de continuidad en la transición entre candidatos a CGs y candidatas a UCDs. Para esto particionamos la muestra de candidatos a CGs en torno a cada galaxia en seis grupos de igual tamaño a partir de su magnitud. Luego operamos de la misma forma con las candidatas a UCDs, separándolas en tres grupos esta vez. A partir de ello calculamos en cada grupo la proporción de objetos azules presentes, aplicando las correcciones por contaminación del caso. El resultado de esto se tiene en la Figura 4.6. Debemos tener en cuenta que resultados de objetos más débiles que magnitud 23.3 estarán fuertemente influenciados por la incompletitud.

Tal como habíamos indicado previamente, el porcentaje de objetos azules

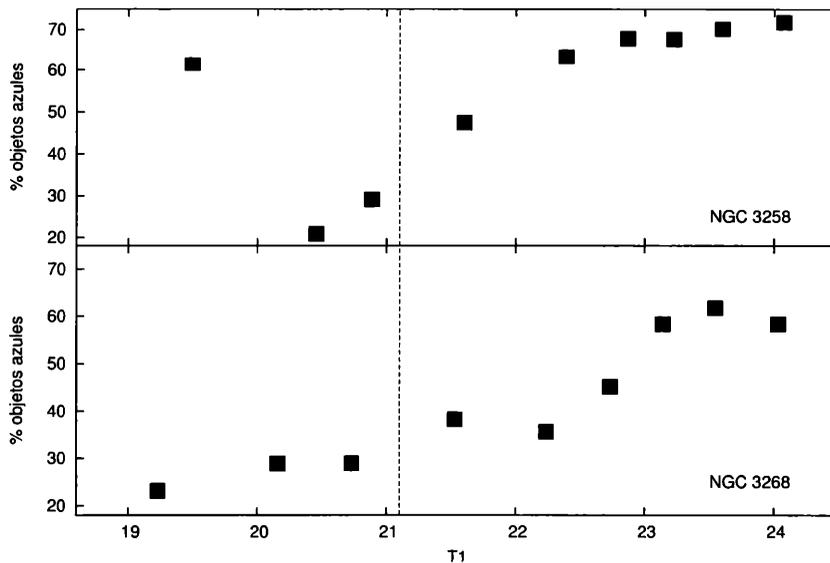


Figura 4.6: Porcentaje de candidatos azules en función de la magnitud.

desciende conforme nos desplazamos a intervalos más brillantes. Sin embargo, esta variación difiere para los objetos cercanos a una u otra galaxia. En el caso de NGC 3268 la proporción de candidatos a CGs azules decrece rápidamente, de modo que en la interfase CGs-UCDs parecería existir una cierta continuidad en las proporciones. En cambio, los candidatos a CGs cercanos a NGC 3258 son mayoritariamente azules en gran parte del rango de magnitudes de esta clase de objetos. Aún así, la transición entre CGs y UCDs no aparenta generar cambios bruscos en el comportamiento de las poblaciones. Para los objetos cercanos a NGC 3258, el intervalo más brillante se aleja de la tendencia marcada por los anteriores, lo cual era previsible dado el escaso número de candidatas *rojas* con $T_1 < 19.65$ encontradas en esta zona.

4.2. Función de luminosidad

En la Figura 4.7 reproducimos las funciones de luminosidad corregidas por contaminación de fondo de las candidatas a UCDs en los alrededores de NGC 3258 y NGC 3268, respectivamente. Se observa, como ya hemos mencionado anteriormente, que la muestra en torno a NGC 3268 tiene una mayor contribución de objetos brillantes ($T_1 < 19.65$). A continuación compararemos, para cada galaxia, el extremo brillante de la distribución de magnitudes de los candidatos a CGs, con el extremo débil de la correspondiente a las

candidatas a UCDs.

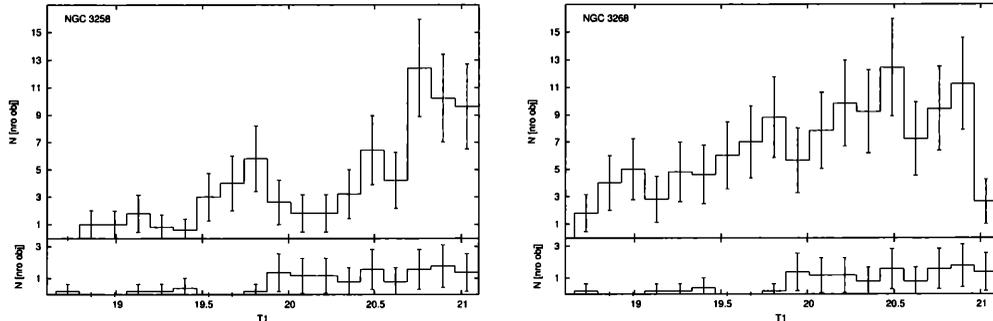


Figura 4.7: Función de luminosidad de candidatas a UCDs cercanas a cada galaxia. Los paneles inferiores corresponden al campo de comparación.

Los sistemas de CGs en todas las galaxias presentan una función de luminosidad que, particularmente en el caso de galaxias brillantes, puede ser ajustada por una función gaussiana (por ej. Jordán et al. 2007). Más aún, independientemente del tipo de galaxia a la que estén asociados, las condiciones del entorno o las características intrínsecas de la población de CGs, presentan un máximo (“turn over”) en $M_V \approx -7.5$ mag (por ej. Richtler 2003, Jordán et al. 2007).

Esta característica puede ser utilizada para estimar distancias al sistema. En nuestro caso, dado que no estamos aplicando correcciones por completitud, nos limitaremos a utilizar las distancias calculadas previamente por otros autores para obtener el mejor ajuste a nuestra distribución experimental. Para realizar esto consideramos los módulos de distancia obtenidos por Bassino et al. (2008), a partir de las respectivas funciones de luminosidad de CGs en el visual: $(m_V - M_V) = 32.42 \pm 0.19$ para NGC 3258 y $(m_V - M_V) = 32.81 \pm 0.20$ para NGC 3268. Luego tomamos la magnitud absoluta visual del punto de “turn over” derivada por Jordán et al. (2007) para el sistema de CGs de la Vía Láctea, $M_V \approx -7.5 \pm 0.1$. Por último, para obtener su magnitud aparente en T_1 , utilizamos la relación $V - R \approx 0.6$, obtenida a partir de una muestra de CGs de la Vía Láctea (Dirsch et al. 2003b), y finalmente $R - T_1 = -0.02$ (Geisler 1996), habiendo explicado previamente en esta Tesis los motivos del uso de esta última corrección.

De esta forma, para ajustar la función teórica a nuestras muestras, consideramos una expresión de la forma:

$$f(m) = \frac{A}{\sqrt{2\pi} B} e^{-\frac{(m-m_{T_1})^2}{2 B^2}} \quad (4.1)$$

Siendo la magnitud aparente del “turn over”, $m_{T_1} \approx 24.34 \pm 0.21$ para NGC 3258 y $m_{T_1} \approx 24.73 \pm 0.22$ para NGC 3268. Estos valores son similares a los que Dirsch et al. (2003b) consideraron viables en su trabajo, pese a que ellos optaron por una magnitud de “turn over” ligeramente distinta, y posteriormente aplicaron las correcciones por metalicidad derivadas por Ashman et al. (1995). Puesto que la incompletitud de la muestra nos permite realizar el ajuste hasta magnitudes más brillantes que el “turn over”, es conveniente considerar la dispersión de la gaussiana (representada por la letra B en la fórmula 4.1) como un parámetro fijo al realizar el ajuste. En la literatura los valores usuales de dispersión se encuentran entre 1.2 y 1.4 (Ashman & Zepf 1998, Bassino et al. 2006b y referencias allí citadas), por lo que optamos por fijar la dispersión en 1.4.

Sin embargo, no fue posible utilizar estos valores para ajustar los candidatos a CGs cercanos a NGC 3268, debido a que los residuos eran demasiado elevados. En este sentido, Dirsch et al. (2003b) indican que la FL de NGC 3268 es peculiar, presentando una menor cantidad de candidatos más débiles que $T_1 = 23.4$; proponen que esto podría deberse a una subestimación de la incompletitud, debida a la presencia de tres galaxias de tipo tardío brillantes en las proximidades de NGC 3268. Teniendo esto en consideración, optamos en este caso por considerar la dispersión de la gaussiana como un parámetro libre.

Tabla 4.1: Parámetros obtenidos por ajustes de mínimos cuadrados a las FL.

Parámetro	NGC 3258	NGC 3268
A	400 ± 20.29	365 ± 11.1
B	1.4	2.02 ± 0.07

A partir de sendos ajustes de mínimos cuadrados se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 4.1. Los ajustes se realizaron teniendo en cuenta la función de luminosidad calculada para intervalos de 0.136 mag, y con una magnitud límite de $T_1 = 23$ mag, por considerar que más allá de este valor la incompletitud ya es importante (Dirsch et al. 2003b). En las Figuras 4.8 y 4.9 se observan, respectivamente, las FL de los candidatos a CGs de NGC 3258 y NGC 3268, corregidas por contaminación. Las curvas graficadas representan los ajustes de funciones gaussianas, realizados tal como fue descrito en los párrafos precedentes.

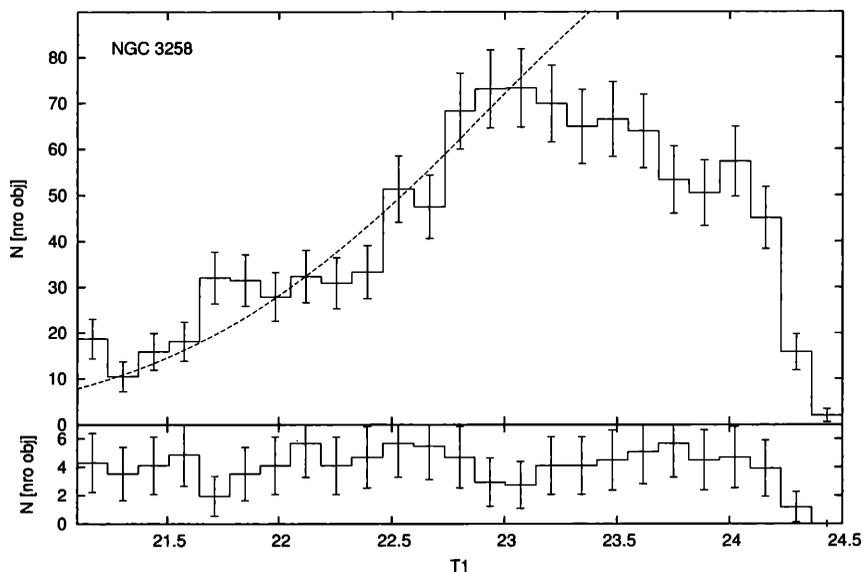


Figura 4.8: Función de luminosidad de los candidatos a CGs próximos a NGC 3258. La curva representa el ajuste de una función gaussiana. El panel inferior corresponde al campo de comparación.

Sería lógico que, si las candidatas a UCDs realmente pertenecieran a la misma población que los candidatos a CGs, las primeras conformaran una continuación suave hacia magnitudes más brillantes de la función de luminosidad de estos últimos. En las Figuras 4.10 y 4.11 se observa la superposición de las FLs correspondientes a candidatos a CGs y candidatas a UCDs para ambas galaxias. La curva representa la función que resultó de ajustar una gaussiana a la distribución de candidatos a CGs en los alrededores de cada galaxia.

En ambos gráficos, y particularmente en el referido a objetos cercanos a NGC 3268 (Figura 4.11), la FL de la muestra de candidatas a UCDs se diferencia notablemente del valor esperado según la extrapolación de la FL ajustada a los candidatos a CGs, debido a la notable cantidad de candidatas *brillantes* presentes. Por esto, como ya se ha mencionado, nos centraremos en comparar la FL de aquellas candidatas a UCDs débiles (con $T_1 > 19.65$) y la extrapolación del ajuste de la FL de los candidatos a CGs en cada caso.

La Figura 4.10 corresponde a los objetos cercanos a NGC 3258; el número de candidatas detectadas es, en líneas generales, superior al número esperado a partir de la extrapolación de la distribución de los candidatos a CGs. Aplicando un test de ajuste χ^2 (Brandt, 1970) entre la muestra de candidatas a

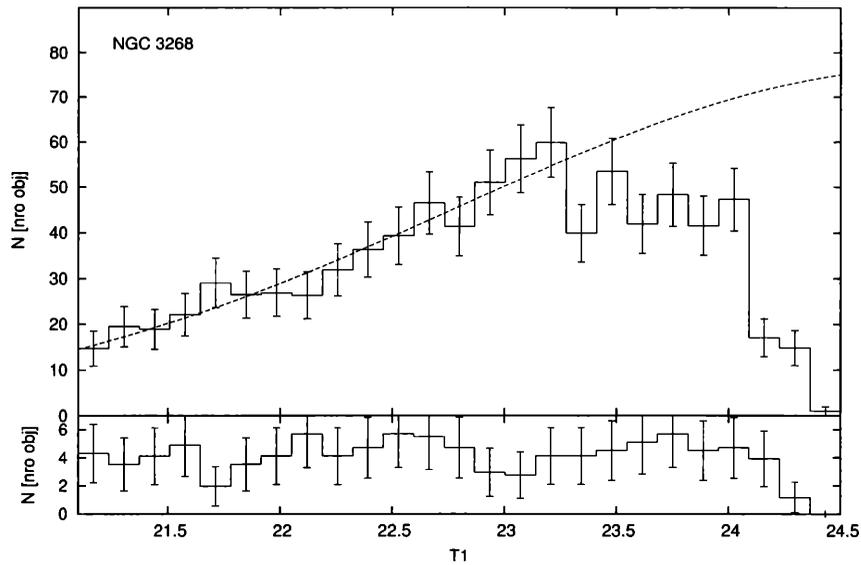


Figura 4.9: Función de luminosidad de los candidatos a CGs próximos a NGC 3268. La curva representa el ajuste de una función gaussiana. El panel inferior corresponde al campo de comparación.

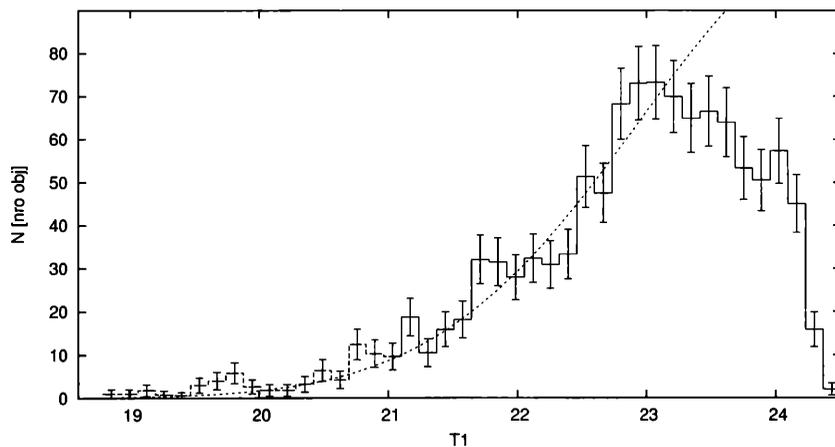


Figura 4.10: FL de candidatos a CGs y candidatas a UCDs, cercanos a NGC 3258. La curva a trazos representa el ajuste de una función gaussiana a la distribución de CGs.

UCDs *débiles* y la extrapolación de la FL ajustada a los candidatos a CGs, resulta que se rechaza la hipótesis de que la muestra sea descrita por la

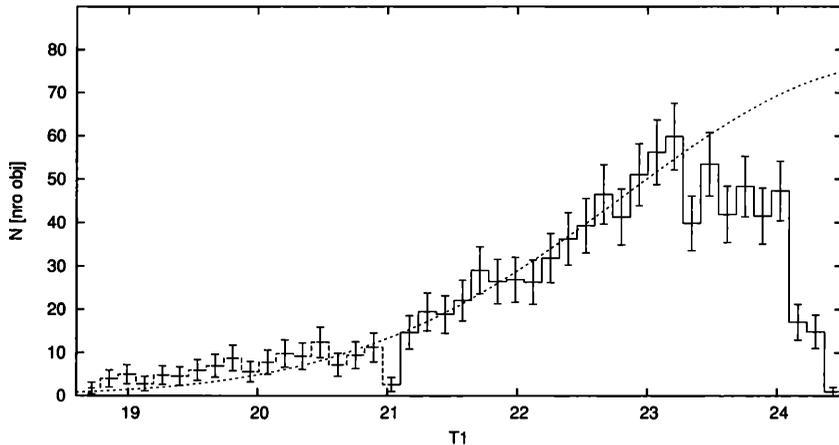


Figura 4.11: FL de candidatos a CGs y candidatas a UCDs, cercanos a NGC 3268. La curva a trazos representa el ajuste de una función gaussiana a la distribución de CGs.

función propuesta con el 90 % de confianza.

En la Figura 4.11 se reprodujo el mismo gráfico teniendo en cuenta las muestras de candidatos a CGs y candidatas a UCDs próximos a NGC 3268. Puesto que los parámetros que surgieron de ajustar la FL a los candidatos a CGs en este caso indican una mayor dispersión de la muestra, en el caso en que las candidatas a UCDs pertenezcan a la misma población que los CGs sería esperable detectar un mayor número de ellas respecto de las observadas en NGC 3258. No obstante, en prácticamente todos los intervalos considerados, la FL de candidatos a CGs subestima el número de objetos observados, y en varias ocasiones el residuo entre ambos es superior al error poissoniano propuesto, indicando que podría no tratarse de una única población más allá de las incertezas. Nuevamente realizamos un test de ajuste entre la muestra de candidatas a UCDs *débiles* y la extrapolación de la FL ajustada a los candidatos a CGs, dando como resultado el rechazo de que la FL describa la distribución de la muestra de candidatas a UCDs *débiles* con el 90 % de confianza.

En la serie de gráficos a continuación se intenta vislumbrar si existe alguna correlación entre la magnitud promedio de las candidatas a UCDs y la distancia proyectada a las respectivas galaxias. Junto con esto se repite el mismo procedimiento con los candidatos a CGs más brillantes que $T_1 = 23.3$, a fin de contrastar ambas muestras y analizar sus comportamientos.

En el caso de las muestras de candidatos a CGs (Figura 4.12), se dividió el

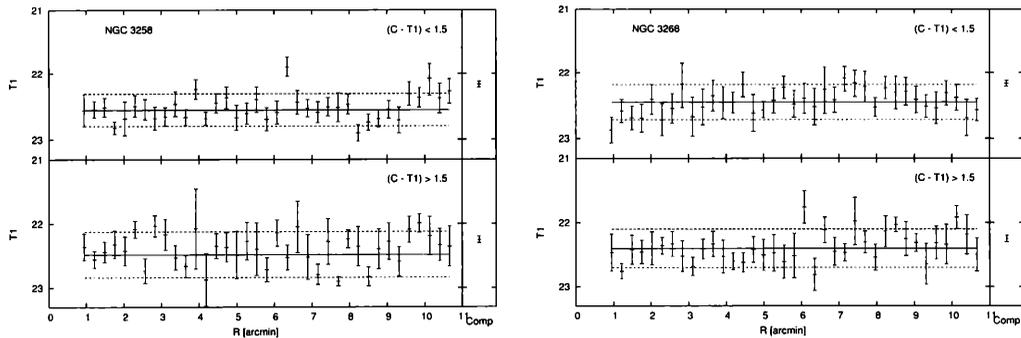


Figura 4.12: Magnitud promedio de los candidatos a CGs con $T_1 < 23.3$ en función del radio galactocéntrico. A la derecha de cada gráfico se tiene el promedio de los objetos situados en el campo de comparación junto con su error. Líneas sólidas indican el promedio pesado, y punteadas, su error.

rango de radios considerado en 40 intervalos. En ninguno de los gráficos se aprecia una clara tendencia. Si bien en algunos se observaría un comportamiento ondulatorio, la amplitud resultante está comprendida dentro de los errores de la mayoría de los intervalos calculados, por lo cual no se puede afirmar que realmente exista una correlación. En la porción de objetos más alejados de NGC 3258, se obtuvo un incremento de la magnitud promedio, pero si tenemos en cuenta que el número de candidatos a CGs desciende con la distancia, y que el estimador del valor medio de los objetos en el campo de comparación indica que estos serían en promedio más brillantes (ver Figura 4.12), tal comportamiento podría ser explicado a partir de la creciente contribución de la contaminación. El gráfico de candidatos a CGs azules cercanos a NGC 3258, presenta un valor claramente segregado respecto del resto en $R \approx 6'.3$; también ocurre algo similar para los candidatos a CGs rojos próximos a NGC 3268 en $R \approx 6'$. Ambos se encuentran a una distancia respecto del promedio pesado, superior a dos veces el error. Sin embargo, al intentar ubicar los objetos que corresponden a ese intervalo de valores, comprobamos que no aparentan tener alguna distribución espacial específica que pudiera poner en duda su procedencia.

En la Figura 4.13 se expone la distribución de magnitudes promedio en función de la distancia proyectada a la galaxia más cercana para las candidatas a UCDs débiles. No se incluyen aquellos objetos con $T_1 < 19.65$ debido a que, por su distribución radial (dirigirse a la Sección 5.1 para más detalles) puede inferirse que llevarían a que la muestra entera de candidatas no respondiera a la distribución observada en los candidatos a CGs, particularmente para objetos cercanos a NGC 3268. Considerando esto, es que se restringió la

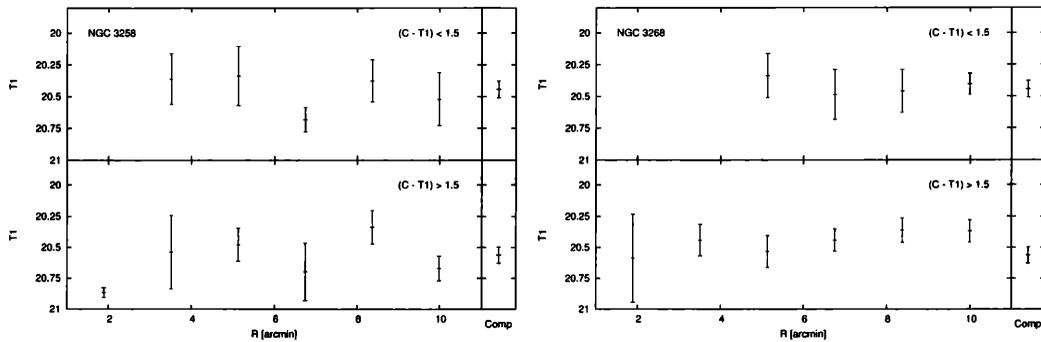


Figura 4.13: Magnitud promedio de las candidatas a UCDs débiles en función de la distancia proyectada a la galaxia más cercana. A la derecha de cada gráfico se indica el promedio de los objetos situados en el campo de comparación junto con su error.

estimación a las candidatas débiles, a fin de comprobar si el comportamiento de los promedios en estas puede ser comparado o no con el de los candidatos a CGs.

Tanto en las candidatas *rojas* como *azules* alrededor de NGC 3258, se observa un aparente mínimo de la distribución en aproximadamente $6'.1$, siendo más evidente en la muestra *azul* debido a su menor error. También se observa que las candidatas *rojas* promediadas en el rango más próximo a NGC 3258 son más débiles que el resto de la muestra. Pese a estas consideraciones, no hay evidencias contundentes de que la magnitud promedio varíe con la distancia. En el caso de las candidatas en los alrededores a NGC 3268, los diferentes intervalos muestran una variación mucho menos significativa, debido probablemente al mayor tamaño de la muestra, lo cual conlleva una reducción del ruido.

Se observa que el número de candidatas a UCDs *azules* no alcanza el mínimo (dos objetos) necesario para estimar el promedio y su error en las regiones más próximas a cada galaxia; en cambio las candidatas *rojas* a esas mismas distancias se encuentran en mayor número.

Capítulo 5

Perfiles radiales y dependencia angular

5.1. Distribución radial

Antes de analizar las distribuciones radiales de las candidatas a UCDs, vamos a estimar cuáles son las expresiones que mejor ajustan a las diferentes muestras de candidatos a CGs que hemos conformado, de acuerdo a como ha sido señalado a lo largo de este trabajo. Para tales ajustes se propusieron, entre otras, las tres expresiones siguientes: una Ley de Potencia **(1)**, un Perfil de De Vaucouleurs **(2)**, tales como fueron utilizados por Bassino et al. (2008), y un Perfil de Hubble Modificado **(3)** (Dirsch et al. 2003b, Binney & Tremaine 1987)

$$f(r) = k r^l \quad (5.1)$$

$$f(r) = m e^{-n (r^{0.25}-1)} \quad (5.2)$$

$$f(r) = p \left(1 + \left(\frac{r}{q}\right)^2\right)^{-s} \quad (5.3)$$

donde $f(r)$ representa la densidad numérica proyectada.

La Figura 5.1 muestra la distribución radial proyectada en escala logarítmica de candidatos a CGs cercanos a NGC 3258, realizada en base a intervalos de $13''$. Tal como se indica en el gráfico, el panel superior corresponde a los candidatos azules, en tanto el inferior a los rojos. Las tres curvas corresponden al ajuste por mínimos cuadrados de las expresiones propuestas. A partir de sus residuos, determinamos que en la población roja el mejor

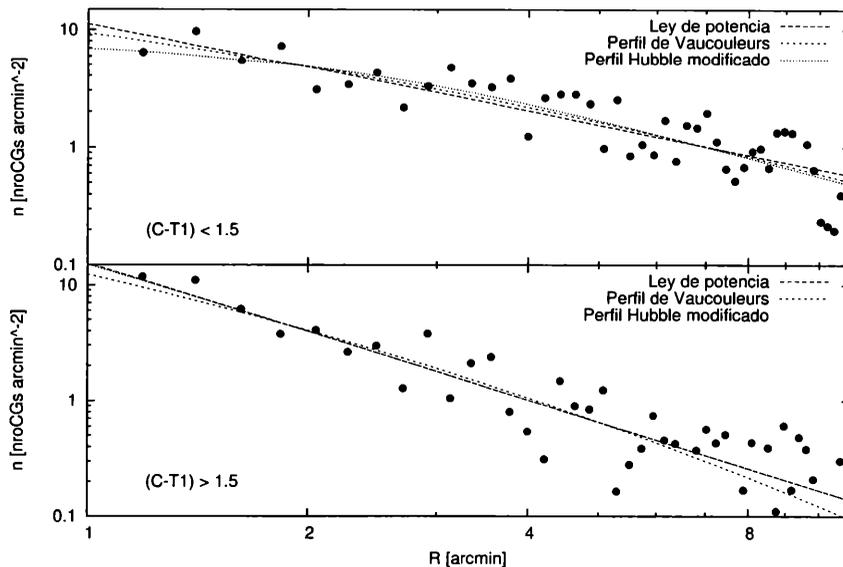


Figura 5.1: Distribución radial proyectada de candidatos a CGs cercanos a NGC 3258. Las curvas representan los ajustes por mínimos cuadrados de las respectivas funciones.

ajuste lo brinda una Ley de Potencia de parámetros $k = 15.63 \pm 2.31$ y $l = -1.98 \pm 0.13$, mientras que el Perfil de Hubble Modificado presenta residuos levemente superiores. Para la población azul, los menores residuos se obtienen con un Perfil de Hubble Modificado; sin embargo, los parámetros determinados por el ajuste presentan errores demasiado elevados, por lo que la incerteza sobre la bondad del ajuste nos lleva a escoger el Perfil de de Vaucouleurs, de parámetros $m = 9.42 \pm 1.332$ y $n = 3.59 \pm 0.293$.

En forma análoga, la Figura 5.2 muestra la distribución radial proyectada en escala logarítmica de candidatos a CGs cercanos a NGC 3268. En este caso, si bien para ambos grupos de objetos los menores residuos se obtienen mediante el ajuste de un Perfil de Hubble Modificado, la mejora respecto al Perfil de De Vaucouleurs es despreciable. Habida cuenta de que el Perfil de Hubble Modificado implica el ajuste de un tercer parámetro, lo cual puede tanto aportar un buen ajuste como modelar errores observacionales que no deseamos se introduzcan en el análisis, optamos en ambos casos por escoger el Perfil de De Vaucouleurs. En el gráfico de la población roja se puede apreciar que en el rango de distancias $5' < R < 7'$, los valores estimados a partir de la muestra de candidatos a CGs, son sistemáticamente inferiores a los esperados a partir de la tendencia marcada por el resto de los intervalos.

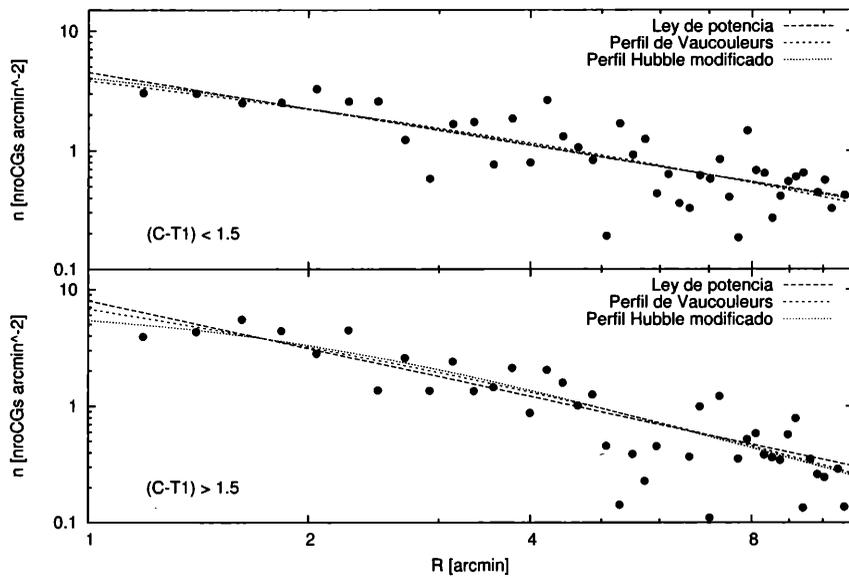


Figura 5.2: Distribución radial proyectada de candidatos a CGs cercanos a NGC 3268. Las curvas representan los ajustes por mínimos cuadrados de las respectivas funciones.

Más adelante volveremos sobre este comportamiento, tratando de encontrar posibles explicaciones; tras comprobar que este conjunto de valores tiene un efecto significativo sobre el ajuste de las distintas distribuciones, decidimos no tenerlos en cuenta. A partir de ello, los ajustes presentan menores residuos y, visualmente, alcanzan un mejor acuerdo con el resto de los valores. Para los candidatos rojos los parámetros determinados son $m = 7.04 \pm 1.02$ y $n = 4.15 \pm 0.33$, mientras que para los azules $m = 4.38 \pm 0.85$ y $n = 3.31 \pm 0.4$.

Al observar ambas Figuras se aprecia que el sistema de CGs de NGC 3258 presenta densidades numéricas mayores en todo el rango de distancias considerado. Para los objetos alrededor de ambas galaxias se observa que los candidatos azules no están tan concentrados hacia la galaxia, presentando densidades centrales menores que los rojos y pendientes menos pronunciadas (como lo demuestran las pendientes obtenidas con los ajustes para NGC 3268). Para comparar cuantitativamente las distribuciones de candidatos a CGs azules y rojos, es necesario que todas sean ajustadas por el mismo perfil. Por este motivo, consideramos oportuno indicar los parámetros obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados de un Perfil de De Vaucouleurs a los candidatos a CGs rojos de NGC 3268, resultando $m = 12.58 \pm 1.98$ y $n = 6.03 \pm 0.47$

Para continuar con el análisis de las distribuciones radiales procederemos

a graficar las correspondientes a las candidatas a UCDs. En principio trataremos a candidatas *débiles* y *brillantes* como una única muestra, y en base a los resultados se considerará si se justifica graficarlas por separado. Puesto que, a diferencia de los candidatos a CGs, en este caso desconocemos si la distribución de los objetos ajustará alguna función en particular, optamos por no utilizar una escala logarítmica, a fin de poder visualizar los resultados con mayor facilidad.

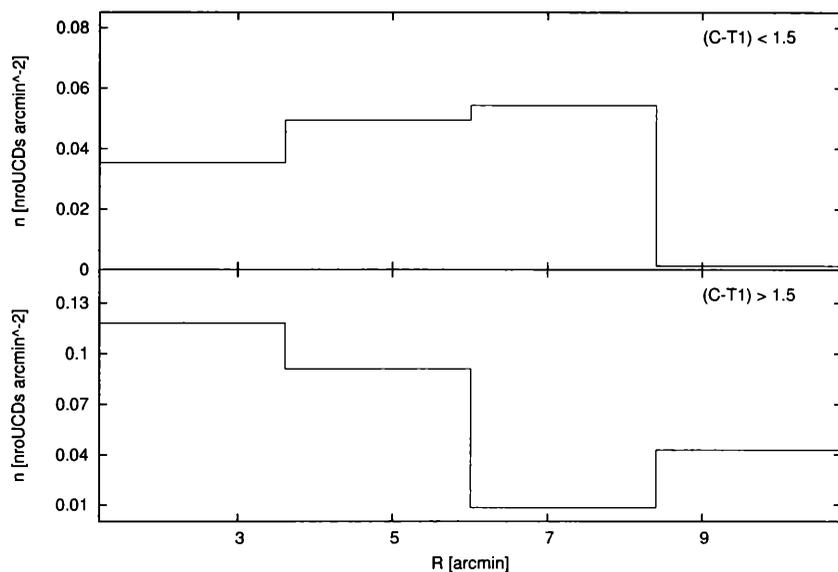


Figura 5.3: Distribución radial proyectada de candidatas a UCDs cercanas a NGC 3258.

La Figura 5.3 corresponde a la distribución radial de candidatas a UCDs cercanas a NGC 3258. Debido al escaso número de objetos que compone cada muestra, se optó por considerar intervalos mayores para realizar el histograma. En todos los histogramas hemos considerado errores poissonianos.

Los objetos *azules* presentan una distribución irregular. Si bien la densidad numérica parece aumentar con la distancia, esta variación entraría dentro de los errores. La distribución de objetos *rojos*, en cambio, parecería indicar que, en promedio, la densidad de candidatas sería inversamente proporcional a las distancias respecto a NGC 3258, en forma similar a lo observado en los candidatos a CGs.

El caso de las candidatas a UCDs en los alrededores de NGC 3268, tal como se ha visto anteriormente con otras propiedades, guarda pocas similitudes con las figuras previas. En la Figura 5.4 se aprecian los histogramas de las distribuciones radiales para candidatas *rojas* y *azules*. En el primero

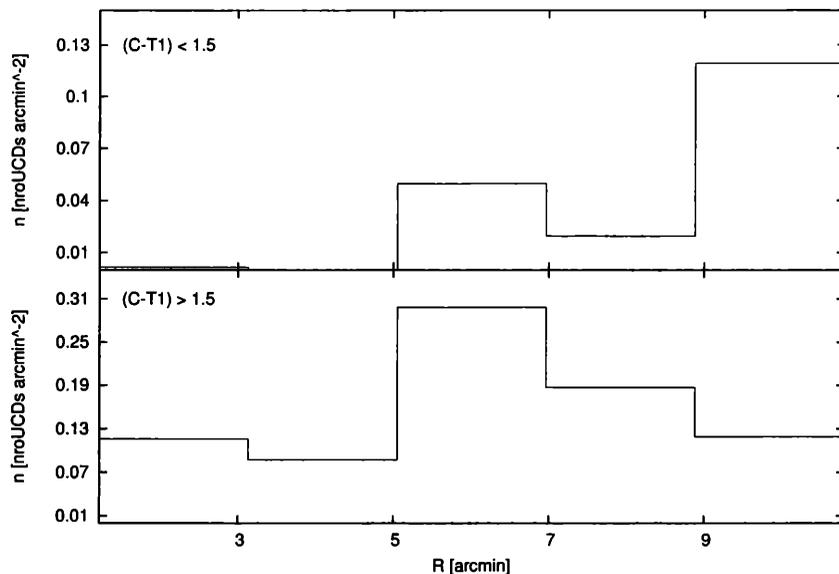


Figura 5.4: Distribución radial proyectada de candidatas a UCDs cercanos a NGC 3268.

(panel inferior) es notable el pico de la distribución entre $5' < R < 7'$, coincidiendo con la ubicación de una porción significativa de las candidatas a UCDs *brillantes*, tal como vimos al estudiar la distribución espacial proyectada (Capítulo 3). Este rango de distancias a NGC 3268 coincide con aquel en que se observa un descenso brusco en los valores de densidad numérica determinados para los candidatos a CGs rojos (ver Figura 5.2), lo cual podría indicar una posible relación entre ambas poblaciones. La componente azul presenta una distribución sin concentración alguna hacia la galaxia, y la densidad alcanza su máximo a radios en que los candidatos a CGs se ven claramente disminuidos.

Considerando que una proporción importante de las candidatas a UCDs *rojas* con $T_1 < 19.65$ se encuentran en la zona del mosaico a la que estamos haciendo referencia, puede ayudar a clarificar la situación ver cuál es el comportamiento por separado de candidatas *débiles* y *brillantes*.

Por tal motivo, en la Figura 5.5 se muestra la distribución radial de las candidatas a UCDs *rojas* cercanas a NGC 3268, diferenciadas según su magnitud. En el panel superior, correspondiente a las candidatas *brillantes*, vemos que persiste el pico de la distribución en una franja de valores similar a los descritos en párrafos anteriores, en torno a $R \approx 5'$. La ínfima cantidad de objetos de iguales características hallados en el campo de comparación, lleva a que prácticamente la totalidad de la muestra sobreviva a la corrección

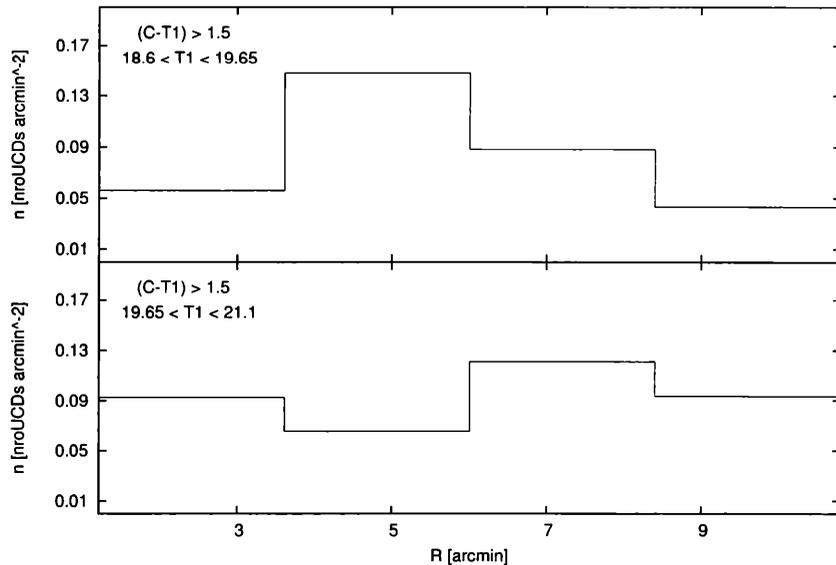


Figura 5.5: Distribución radial proyectada de candidatas a UCDs *rojas* cercanas a NGC 3268, diferenciadas según su magnitud.

por contaminación. En el panel inferior no se aprecia una correlación entre la densidad numérica de objetos y la distancia de estos a la galaxia. Un comportamiento como el observado en esta distribución es el que podríamos esperar en objetos de campo, cuya ubicación cercana a NGC 3268 respondería únicamente a un efecto de proyección, sin ningún tipo de vínculo real con el cúmulo de Antlia o la galaxia NGC 3268 en particular.

A continuación se intentará comprobar si existe alguna dependencia entre la distribución radial de candidatos a CGs y su magnitud, que pudiera servir de nexo entre los candidatos a CGs brillantes y las candidatas a UCDs. En busca de este objetivo, dividimos la muestra de candidatos a CGs asociados a ambas galaxias en tres grupos de igual cantidad de miembros, basándonos en su magnitud. Una vez generadas estas submuestras, estimamos las distribuciones radiales diferenciando aquellos objetos que se hallaban en el rango de los CGs azules y rojos, a una distancia de entre $1' < R < 10'8$.

En las Figuras 5.6 y 5.7 se observan las distribuciones radiales en escala logarítmica para los tres intervalos de candidatos a CGs. Las curvas a trazos representan el ajuste por mínimos cuadrados de un Perfil de De Vaucouleurs, por ser la expresión que hallamos previamente que mejor ajustaba a estos objetos. Debemos recordar que no hemos estimado aún niveles de completitud, razón por la cual solo tuvimos en cuenta aquellos candidatos a CGs con

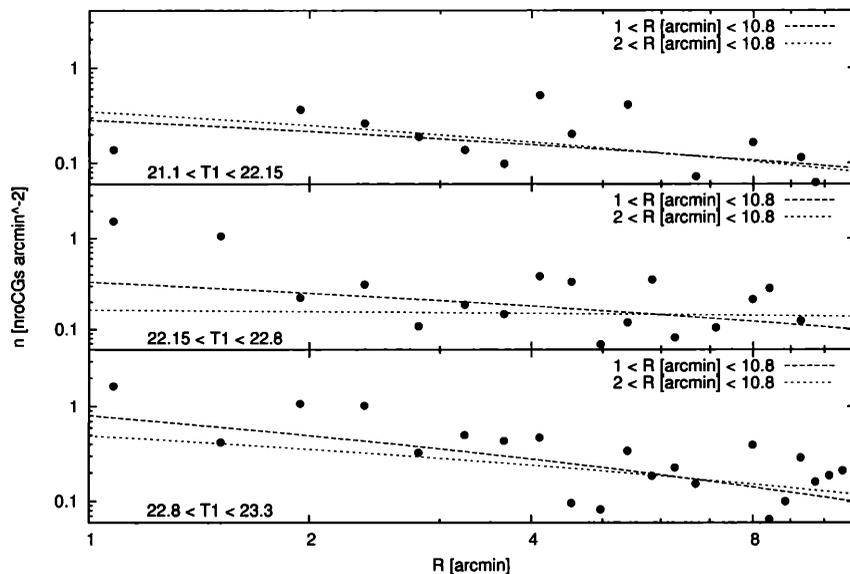


Figura 5.6: Distribución radial de candidatos a CGs azules cercanos a NGC 3268, diferenciados según su magnitud en tres grupos. Las curvas representan el ajuste de un Perfil de De Vaucouleurs en los rangos indicados en la figura.

$T_1 < 23.3$, puesto que los niveles de completitud podrían ser especialmente bajos para objetos débiles muy próximos a alguna de las dos galaxias. Es por ello que, para los tres grupos de objetos, decidimos, por un lado, ajustar el perfil a todo el conjunto de datos, y, por el otro, realizar el ajuste solo a aquellos con distancias a las galaxias mayores de $2'$. En los dos grupos de objetos más débiles, se observa que este último ajuste indica una menor concentración en torno a la galaxia, de lo cual deducimos que la incompletitud que pudiera causar la luminosidad de las galaxias no es considerable más allá de $1'$ para estos rangos de magnitud.

Este procedimiento se repitió tanto para los candidatos a CGs azules como rojos, próximos a cada galaxia, sin encontrar que la variación de las distribuciones presentara una tendencia clara. Si bien los parámetros resultantes del ajuste varían, el cambio no es significativo ni parece responder a una relación particular. Al comparar los distintos intervalos se encuentra, invariablemente, que la distribución de candidatos azules tiene una concentración en torno a cada galaxia menor que los rojos; prueba de esto es la diferencia en las densidades numéricas que extrapolan los ajustes para $R = 1'$.

En los tres paneles que conforman la Figura 5.7 existen indicios de una

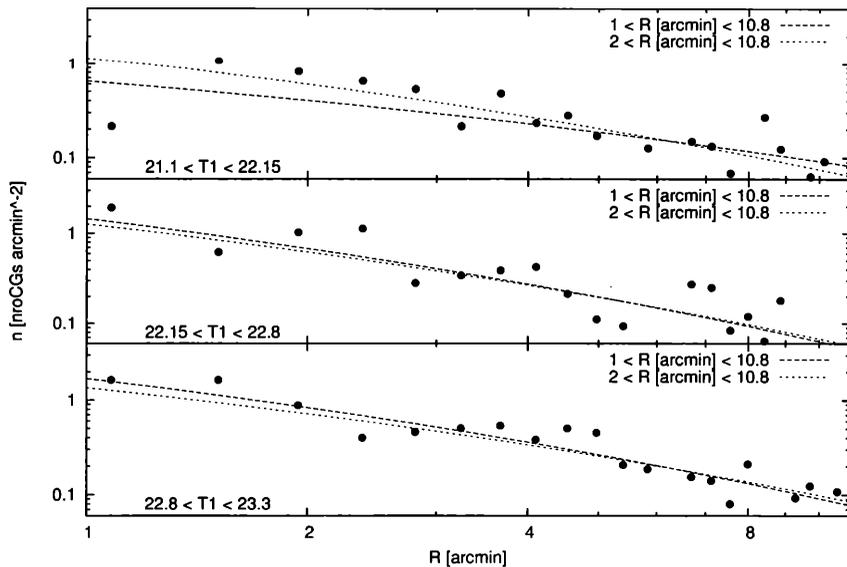


Figura 5.7: Distribución radial de candidatos a CGs rojos cercanos a NGC 3268, diferenciados según su magnitud en tres grupos. Las curvas representan el ajuste de un Perfil de De Vaucouleurs en los rangos indicados en la figura.

menor presencia de candidatos a CGs rojos en el rango $5' < R < 7'$, aunque esto no es tan evidente en los gráficos individuales.

5.2. Nuevo análisis para detección de CGs intracúmulo

A modo de complemento, abordaremos a continuación la posible existencia de CGs intracúmulo. Esto es, CGs que no estarían asociados con alguna galaxia en particular, sino con el pozo de potencial del cúmulo en su conjunto. La existencia de este tipo de objetos ha sido tratada por diversos trabajos en la literatura (Minniti et al. 1998, Bassino et al. 2003, por ej.), e inclusive Bassino et al. (2008) intentaron comprobar su existencia en el cúmulo de Antlia, sin hallar evidencias que pudieran confirmarlo. Basándonos en las nuevas observaciones disponibles, podemos ahora determinar la contaminación de fondo a partir de un nuevo campo de comparación, más alejado de las galaxias dominantes que el empleado en Bassino et al. (2008). Como hemos mencionado anteriormente, esto podría llevar a una mejor estimación de

dicha contaminación, lo que justifica volver a analizar esta posibilidad.

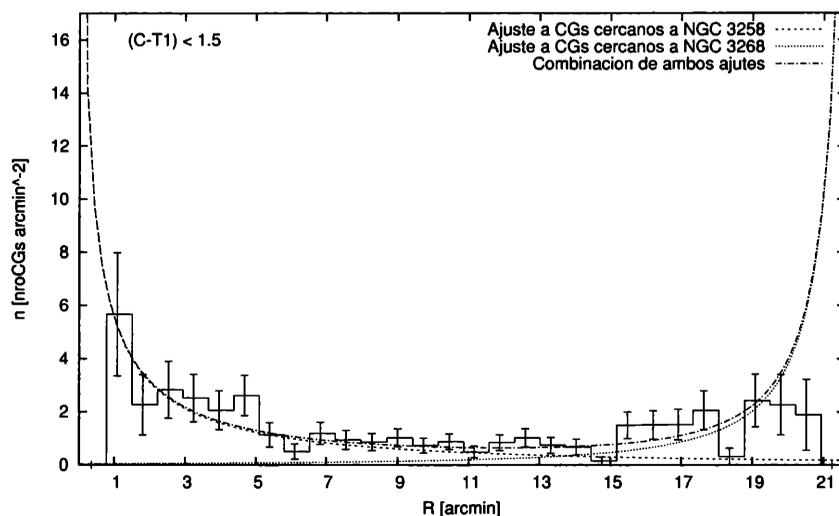


Figura 5.8: Distribución radial de candidatos a CGs azules. Las curvas representan el ajuste de un Perfil de De Vaucouleurs para intervalos próximos a cada galaxia.

Tuvimos en cuenta aquellos candidatos a CGs que se encuentran dentro de los sectores de circunferencia centrados en NGC 3258 y NGC 3268, respectivamente, cuya orientación angular se aparta hasta 39° respecto de la línea que une ambas galaxias. En base a esta muestra de objetos, determinamos la distribución radial de los candidatos, tal como se indica en las Figuras 5.8 y 5.9. El eje de las abscisas indica la distancia angular desde NGC 3258.

En la primera de estas figuras, correspondiente a los candidatos a CGs azules, ajustamos sendos perfiles de De Vaucouleurs a la distribución de los candidatos ubicados entre $1'.5 < R < 8'$ de alguna de las dos galaxias. El límite inferior en el intervalo de R fue escogido debido a que, por debajo de este valor, el nivel de incompletitud podría ser elevado, y en consecuencia verse tendencias en los ajustes que no se correspondan con la realidad. El límite superior de R se elige para poder realizar el ajuste en base a aquellos candidatos a CGs ubicados hasta una distancia angular tal que, de formar parte del sistema, sería probable que se encontraran asociados específicamente a alguna de las dos galaxias. De tal modo, se podría analizar cómo se comporta la distribución en la región más alejada de ambas galaxias. La curva indicada como “Combinación de ambos ajustes” es la suma de los dos perfiles. En

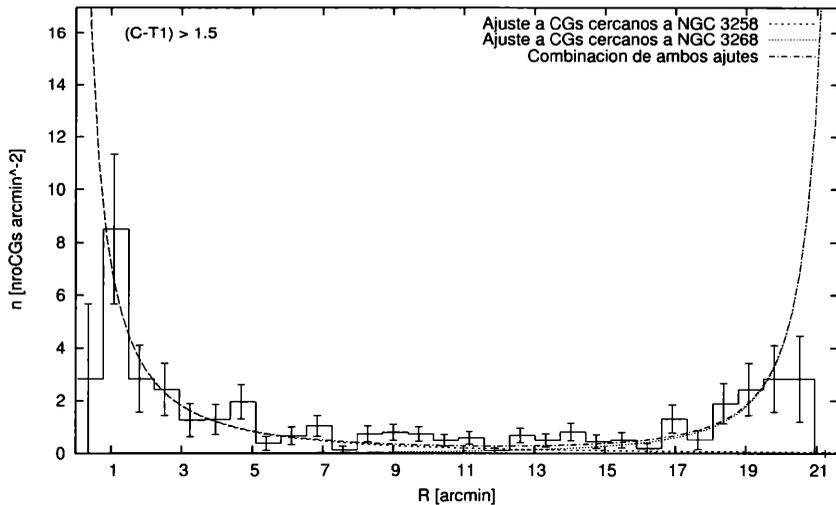


Figura 5.9: Distribución radial de candidatos a CGs rojos. Las curvas representan el ajuste de un Perfil de De Vaucouleurs para intervalos próximos a cada galaxia.

base al ajuste de ambos perfiles encontramos que no se observa en el intervalo comprendido entre $8' < R < 14'$ evidencia contundente de un exceso de objetos detectados, que pudiesen indicar la presencia de CGs intracúmulo. Si bien en algunos intervalos la densidad de objetos es mayor a la esperada a partir de la suma de perfiles, esta diferencia se encuentra dentro de los errores, con lo cual el exceso no es significativo.

En la Figura 5.9 se repitió el procedimiento para aquellos candidatos a CGs rojos. Debido a que los CGs rojos tienden a ubicarse más concentrados en torno a la galaxia huésped, consideramos a los candidatos ubicados entre $1.5' < R < 7'$ de cada una de las dos galaxias para realizar los ajustes. En este caso, parecería existir en $7' < R < 15'$, una mayor densidad de CGs que la esperada a partir de la suma de perfiles. Esta diferencia es marginal, dado el escaso número de CGs rojos a estas distancias proyectadas, pero resulta más convincente que la que muestran los CGs azules.

5.3. Distribución acimutal

En sus trabajos acerca del sistema de CGs de NGC 3258 y NGC 3268, tanto Dirsch et al. (2003b) como Bassino et al. (2008) hallaron que los siste-

mas de CGs de ambas galaxias son elongados (en proyección), encontrándose sus ángulos de posición en buen acuerdo con la dirección que las une.

En la Figura 5.10 graficamos la distribución angular para todos aquellos candidatos a CGs que se encuentran a una distancia angular menor a $10''$ de cada una de las dos galaxias dominantes en función del ángulo acimutal (AZ) definido como un ángulo de posición (medido desde el Norte y positivo hacia el Este). Un sistema de CGs con distribución elíptica debería presentar una distribución acimutal de la densidad numérica con comportamiento sinusoidal, por lo que ajustamos una función de este tipo con período π a los candidatos a CGs en torno a cada galaxia.

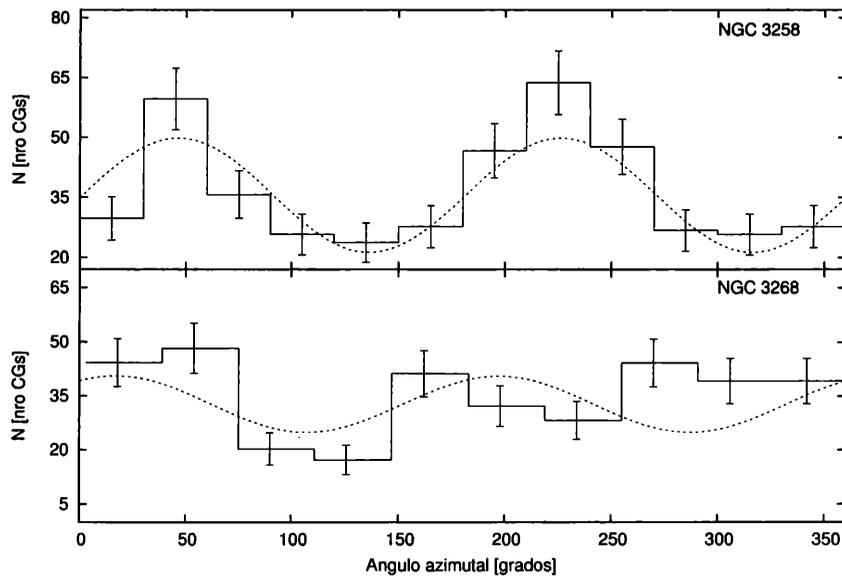


Figura 5.10: Distribución acimutal de candidatos a CGs. Las curvas representan el ajuste de una función seno con período π .

La distribución de los candidatos a CGs cercanos a NGC 3258 (panel superior) presenta dos claros máximos, situados entre los valores $30 < AZ[^\circ] < 60$ y $210 < AZ[^\circ] < 240$. Estos valores están en buen acuerdo con el ángulo acimutal de NGC 3268 medido desde NGC 3258, que es de aproximadamente 51° . Distinta es la situación observada para los candidatos a CGs en torno a NGC 3268 (panel inferior). En este último caso, si bien se observa nuevamente un máximo de la distribución angular que concordaría con el ángulo acimutal de NGC 3268 medido desde NGC 3258, la distribución se aparta del comportamiento de una función sinusoidal para ángulos acimutales mayores que $AZ \approx 200^\circ$, lo cual se traduce en grandes residuos al realizar el ajuste.

En la Figura 5.11 se observa la distribución angular de candidatas a UCDs próximas a NGC 3258 (panel superior) y a NGC 3268 (panel inferior). En ninguno de los dos casos se observan máximos que concuerden con los vistos en las distribuciones de candidatos a CGs. Sin embargo, en ambos casos los ángulos acimutales indicarían que los objetos se encuentran preferencialmente en la región del mosaico situada entre ambas galaxias. En el caso en que los objetos tenidos en cuenta fuesen mayoritariamente contaminación, si esta tuviese una distribución uniforme, sería lógico esperar que la densidad de dichos objetos no dependiese del ángulo acimutal, contrario a lo que sucede en el panel superior entre $180 < AZ[^\circ] < 315$ y en el inferior entre $0 < AZ[^\circ] < 90$. Es interesante notar que en la distribución de las candidatas cercanas a NGC 3268, se observa un número considerable de objetos con $AZ[^\circ] > 250$, coincidiendo con la ubicación del exceso de candidatos a CGs, visto en la Figura 5.10

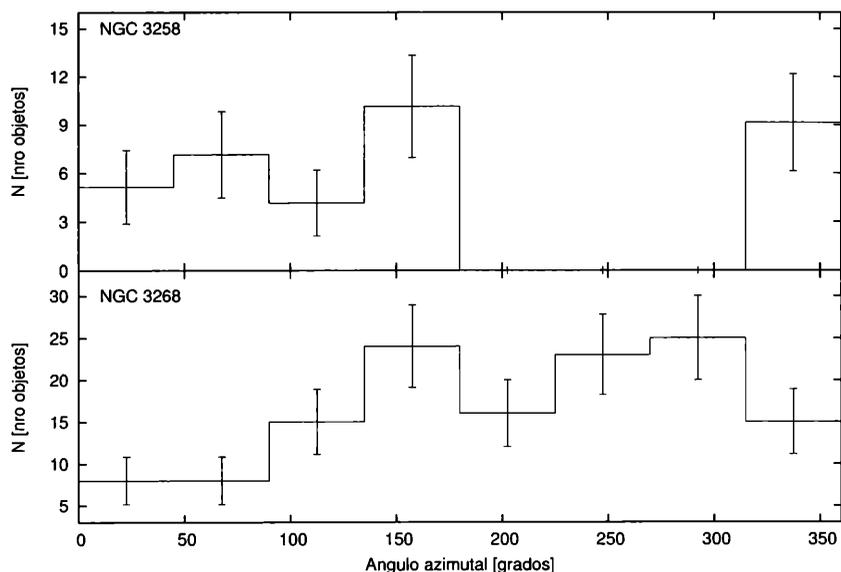


Figura 5.11: Distribución acimutal de candidatas a UCDs.

La Figura 5.12 se muestra a los efectos de visualizar fácilmente cuáles son las regiones que en los gráficos anteriores indicaban una menor densidad de candidatas a UCDs (delimitadas por líneas a trazos). Debe tenerse en cuenta que para declinaciones menores a -35.72° no se observan objetos, siquiera la proporción debida a la contaminación. Esto podría señalar que en esa zona el mosaico tiene algún defecto, por lo cual la fotometría de los objetos allí situados podría ser deficiente y por lo tanto eliminada a través de nuestro

proceso de selección. En cambio, no existen factores externos que parezcan afectar la fotometría del campo indicado en los alrededores de NGC 3268, por lo cual la escasa cantidad de candidatas allí situadas podría deberse a algún proceso asociado al efecto de fuerzas de marea entre las galaxias.

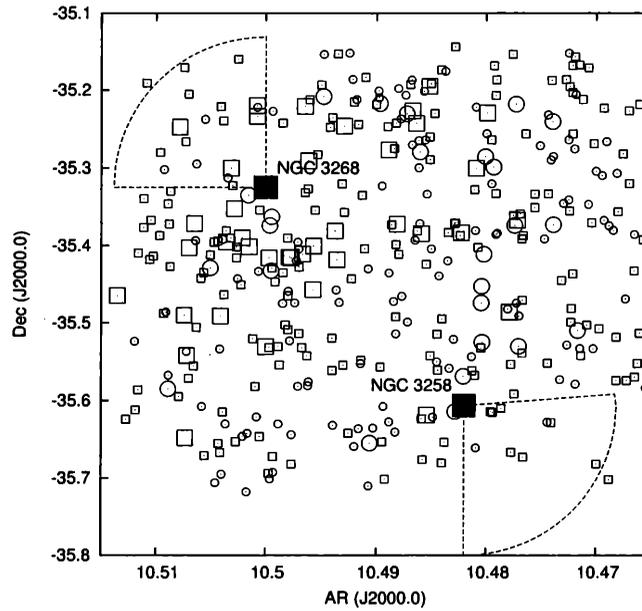


Figura 5.12: Distribución espacial proyectada de candidatas a UCDs, diferenciadas por magnitud y color. Círculos representan candidatas azules, y cuadrados vacíos, candidatas rojas. Objetos con $T_1 < 19.65$ se identifican con símbolos de mayor tamaño que aquellos con $T_1 > 19.65$.

Capítulo 6

Conclusiones

En esta Tesis presentamos la primera búsqueda de candidatas a UCDs en la región central del cúmulo de galaxias de Antlia. La misma fue realizada en base a imágenes obtenidas con la cámara MOSAIC y el telescopio Blanco de 4-m de CTIO, en el sistema fotométrico de Washington. La selección de las candidatas se basó en las propiedades fotométricas que se detallan en la literatura para las UCDs confirmadas en otros cúmulos o grupos. Luego de conformar el catálogo de estas candidatas a UCDs, se compararon los parámetros derivados de las observaciones disponibles, con aquellos correspondientes a los candidatos a CGs ubicados en las cercanías de alguna de las dos galaxias dominantes del cúmulo.

A partir de la distribución espacial proyectada, teniendo en cuenta solo aquellos objetos que distan menos de $10'8$ de alguna de las dos galaxias, notamos que el número de candidatas a UCDs próximas a NGC 3268 es mayor que la cantidad de candidatas en los alrededores de NGC 3258. Por el contrario, el sistema de CGs cercanos a NGC 3258 parece tener una mayor cantidad de miembros, punto en el que concuerdan trabajos anteriores (Dirsch et al. 2003b, Bassino et al. 2008). También se observa que las candidatas a UCDs cuyos colores se encuentran en el mismo rango que los de CGs ricos en metales, se encuentran más concentradas en torno a cada galaxia que aquellas con colores usuales de CGs pobres en metales. Este comportamiento suele reproducirse para las dos poblaciones de CGs, en estas y otras galaxias, como ha sido señalado por varios autores (por ej. Brodie & Strader 2006 y referencias allí citadas).

Al realizar un análisis cualitativo del grado de concentración de las candidatas a UCDs con respecto a las dos galaxias dominantes, hallamos que objetos brillantes podrían encontrarse más apiñados en torno a cada galaxia, en tanto candidatas débiles presentarían una distribución más dispersa. Se ha estimado que la magnitud a la cual se produciría este cambio en la

distribución es $T_1 = 19.65$.

En todos los casos, se observa una clara disminución del número de objetos detectados, en torno a una de las dos galaxias centrales, en la dirección opuesta a la que se ubica su compañera. Esta situación podría indicar la existencia de efectos debidos a fuerzas de marea entre ambas galaxias, lo cual permitiría ubicar al menos a una fracción de las candidatas como miembros del cúmulo.

A través de la comparación de las distribuciones espaciales proyectadas de las candidatas a UCDs brillantes y las galaxias dE,N (Smith Castelli 2008), notamos que la población de estas últimas es menos numerosa y no se las observa en regiones alejadas de las galaxias dominantes, donde sí hallamos candidatas a UCDs. Esto podría indicar que no todas las candidatas a UCDs con magnitud $T_1 < 19.65$ se habrían originado en el desmembramiento de galaxias dE,N debido a fuerzas de marea. Sin embargo, debemos tener en cuenta que hasta disponer de observaciones espectroscópicas de las candidatas a UCDs, no podemos conocer con certeza qué proporción de ellas son en realidad objetos de fondo o estrellas de campo.

En pos de comprobar o descartar la existencia de comportamientos disímiles entre los dos grupos de candidatas a UCDs segregados según su magnitud tal como fue indicado previamente, se optó por tratarlos por separado de aquí en adelante. Se realizaron histogramas de la distribución de color para las candidatas a UCDs próximas a alguna de las dos galaxias; en el caso de las candidatas brillantes ($T_1 < 19.65$), se encontró que aquellas con colores $(C - T_1) < 1.5$ (*azules*) presentan un comportamiento similar en los alrededores de ambas galaxias, con una baja cantidad de objetos y probablemente una considerable contaminación de fondo. En cambio, las candidatas *rojas* presentan claras diferencias, siendo mucho más abundantes en los alrededores de NGC 3268.

La distribución de color para candidatas a UCDs débiles sería bimodal en las cercanías de ambas galaxias, lo cual no es evidente en las candidatas brillantes. Para los objetos próximos a NGC 3258, el intervalo en el cual se encuentra el máximo para las candidatas *azules* suma una cantidad de objetos superior al rango correspondiente a las candidatas *rojas*. Los objetos en torno a NGC 3268, en cambio, presentan un comportamiento opuesto, donde el número de objetos en el intervalo correspondiente a candidatas *rojas* es superior que su contraparte azul. Ambos resultados podrían tener cierta relación con el comportamiento de los cúmulos globulares brillantes: el sistema de CGs de NGC 3258 presenta una predominancia de objetos azules, mientras que los candidatos a CGs rojos brillantes de NGC 3268 son tan numerosos como los azules. En líneas generales, los CGs en torno de NGC 3268 aparentan ser más rojos en comparación con aquellos cercanos a NGC 3258,

observándose un comportamiento similar para las candidatas a UCDs débiles. Todo esto sugiere la existencia de similitudes entre los sistemas de CGs y las candidatas a UCDs débiles. Las candidatas a UCDs *rojas* con $T_1 > 19.65$ cercanas a ambas galaxias presentan distribuciones de color con una mayor dispersión que las candidatas azules.

Al comparar los DCM de candidatos a CGs en distintos rangos de luminosidad, encontramos que la conformación de las muestras podría guardar algún tipo de relación con la magnitud. Por esto, estimamos el porcentaje de objetos azules en distintos rangos de magnitudes, abarcando luminosidades tanto de CGs como de UCDs. Para los objetos cercanos a ambas galaxias encontramos que la transición entre CGs y UCDs podría ser suave, sin variaciones apreciables en la tendencia en torno a $T_1 \approx 21.1$. El porcentaje de objetos azules cercanos a NGC 3258 crece apreciablemente en el intervalo más brillante, debido al escaso número de candidatas a UCDs *rojas* halladas en esa zona del mosaico.

Al determinar la FL de los CGs cercanos a ambas galaxias, nos propusimos averiguar si la extrapolación de los ajustes realizados describe adecuadamente la distribución de candidatas a UCDs, en particular para aquellas con $T_1 > 19.65$, esto es las débiles. Realizando sendos tests de ajuste sobre estas últimas, encontramos que dicha hipótesis es rechazada. Sin embargo, debemos aclarar que debido a la incompletitud de la muestra hacia el extremo débil (la cual queda en evidencia en trabajos previos realizados sobre estas mismas observaciones), se debió considerar la dispersión del ajuste de la FL de CGs cercanos a NGC 3258 como un parámetro fijo. Se estimó su valor en base a estudios en los filtros de Washington de otros sistemas de CGs, presentes en la literatura. El caso de los candidatos a CGs cercanos a NGC 3268 presentó mayores complicaciones, debido a que los valores usualmente propuestos para la dispersión de la FL no permitían obtener un ajuste aceptable. En consecuencia, se consideró como mejor solución tomar la dispersión como un parámetro libre, teniendo en cuenta el peso relativo de los resultados obtenidos.

También analizamos la posible existencia de una correlación entre las magnitudes medias de las candidatas a UCDs y su radio galactocéntrico proyectado respecto a la galaxia dominante más cercana. El resultado fue que no se observan evidencias de que tal correlación exista, más allá de los errores con que se determinaron los promedios, lo cual se condice con lo obtenido para los candidatos a CGs.

Se estudiaron las distribuciones radiales de las candidatas a UCDs cercanas a cada galaxia, diferenciándolas entre *azules* y *rojas*. Solo en las candidatas *rojas* cercanas a NGC 3258 se observa que los objetos tienden a estar concentrados en torno a la galaxia. Las candidatas *azules* en ambos casos

parecen encontrarse más dispersas que sus contrapartes *rojas*. La distribución radial de las candidatas a UCDs *rojas* próximas a NGC 3268 y con magnitudes $T_1 < 19.65$, presenta un claro aumento en la densidad numérica proyectada para distancias galactocéntricas cercanas a $5'$ (Figura 5.5). Es evidente que los gráficos de distribución radial proyectada para candidatas a UCDs presentan escasa resolución en distancia radial. Teniendo en cuenta esto, tal intervalo coincide parcialmente con el descenso en la cantidad de candidatos a CGs rojos en los alrededores de NGC 3268, entre $5' < R < 7'$ (Figura 5.2).

Puesto que las candidatas a UCDs no alcanzan sus máximos de densidad proyectada en las inmediaciones de cada galaxia dominante, se investigó si las distribuciones radiales de candidatos a CGs presentan alguna dependencia con la luminosidad, a fin de comparar con el comportamiento de las candidatas a UCDs. Para ello dividimos las muestras de candidatos a CGs, correspondientes a cada galaxia, en tres intervalos de magnitud aparente y comparamos sus respectivas distribuciones radiales. En ninguno de los casos se observa una tendencia que permita afirmar la existencia de tal dependencia.

Por último, confirmamos la existencia de una dependencia del número de CGs en torno a cada galaxia con el ángulo acimutal, lo que ya fue indicado por otros autores en trabajos previos (Dirsch et al. 2003b, Bassino et al. 2008). Para los objetos cercanos a NGC 3258 dicha dependencia puede ser ajustada por una función seno de período π . En el caso de NGC 3268 la bondad de este ajuste no es tan notoria; debemos recordar que en las proximidades de NGC 3268 se encuentran tres galaxias de tipo tardío brillantes, las cuales podrían presentar sistemas de CGs propios, los cuales serían difíciles de identificar en forma separada respecto al de NGC 3268.

En el caso de las candidatas a UCDs cercanas a cada galaxia encontramos que las distribuciones alcanzan su mínimo en la dirección opuesta a la que se ubica su compañera, lo cual ya habíamos indicado a partir de la distribución espacial.

Los resultados aquí expuestos indicarían que parte de las candidatas a UCDs podrían ser efectivamente miembros del cúmulo. También hemos podido diferenciarlas en dos grupos en base a su magnitud, los cuales muestran algunas características distintivas. Una de las más notorias es que las candidatas a UCDs más brillantes están más cerca (en proyección) de las galaxias centrales, mientras que las más débiles presentan una distribución más extendida. Esta última evidencia sugiere, por un lado la probable existencia de una importante contaminación de fondo, y por otra parte una similitud con los sistemas de candidatos a CGs. Así, parte de las evidencias podrían señalar una relación entre las candidatas a UCDs y los sistemas de CGs, aunque son

necesarios análisis más extensos para obtener conclusiones sólidas al respecto. En tal contexto, la confirmación de sus distancias y pertenencia (o no) al cúmulo mediante velocidades radiales, resulta una información indispensable para avanzar en el conocimiento de este tipo de objetos.

Referencias

- [1] Ashmann K.M., Conti A., Zepf S.E. 1995, AJ, 110, 1164.
- [2] Ashmann K.M. & Zepf S.E. 1998, Globular Cluster Systems, Cambridge Astrophysics Series (Cambridge University Press).
- [3] Bassino L.P., Muzzio J.C., Rabolli M. 1994, ApJ 431, 634.
- [4] Bassino L.P., Cellone S.A., Forte J.C., Dirsch B. 2003, A&A, 399, 489.
- [5] Bassino L.P., Faifer F.R., Forte, J.C., Dirsch B., Richtler T., et al. 2006a, A&A, 451, 789.
- [6] Bassino L. P., Richtler T., Dirsch B., 2006b, MNRAS, 367, 156.
- [7] Bassino L.P., Richtler T. , Dirsch B. 2008, MNRAS 386, 1145.
- [8] Bastian N., Emsellem E., Kissler-Patig M., Maraston C. 2006, A&A, 445, 471.
- [9] Bekki K., Couch W.J., Drinkwater M.J. 2001, ApJ, 552, L105.
- [10] Bertin, E., Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393.
- [11] Binney J., Tremaine S. 1987, Galactic Dynamics (Princeton University Press).
- [12] Brandt S. 1970, Statistical and Computational Methods in Data Analysis (North-Holland Publishing Company).
- [13] Brodie J. P. & Strader J., 2006, ARA&A, 44, 193.
- [14] Côté P., Slawomir P., Ferrarese L., Jordán A., Merrit D., et al. 2006, ApJS, 165, 57.
- [15] De Propris R., Phillipps S., Drinkwater M.J., et al. 2005, ApJ, 623, L105.

- [16] Dirsch B., Richtler T., Geisler D., Forte J.C., Bassino L.P., Gieren W. 2003a, AJ, 125, 1908.
- [17] Dirsch B., Richtler T., Bassino L.P. 2003b, A&A, 408, 929.
- [18] Drinkwater M.J., Jones J.B., Gregg M.D., Phillipps S. 2000, PASA, 17, 2000.
- [19] Drinkwater M.J., Gregg M.D., Colles M. 2001, ApJ, 548, L139.
- [20] Drinkwater M.J., Gregg M.D., Couch W.J., et al. 2004, PASA 21, 375.
- [21] Evstigneeva E.A., Gregg M.D., Drinkwater M.J., Hilker M. 2007, AJ, 133, 1722.
- [22] Evstigneeva E.A., Drinkwater M.J., Peng C.Y., Hilker M., et al. 2008, AJ, 136, 461.
- [23] Faber S.M. & Jackson R.E. 1976, ApJ, 204, 668.
- [24] Ferguson H.C., Sandage A. 1990, AJ, 100, 1.
- [25] Ferguson H.C., Sandage A. 1991, AJ, 101, 765.
- [26] Fellhauer M., Kroupa P. 2002, MNRAS, 330, 642.
- [27] Fellhauer M., Kroupa P. 2005, MNRAS, 359, 223.
- [28] Forte J.C., Faifer F., Geisler D. 2007, MNRAS, 382, 1947.
- [29] Forte J.C., Vega E.I., Faifer F. 2009, MNRAS, 397, 1003.
- [30] Fukugita M., Shimasaku, K., Ichikawa, T. 1995, PASP, 107, 945.
- [31] Geha M., Guhathakurta P., van der Marel R.P. 2002, AJ, 124, 3073.
- [32] Geha M., Guhathakurta P., van der Marel R.P. 2003, AJ, 126, 1794.
- [33] Geisler D. 1996, AJ, 11, 480.
- [34] Graham A.W. 2002, MNRAS, 334, 859.
- [35] Gregg M., Drinkwater M., Evstigneeva E., et al. 2009, AJ, 137, 498.
- [36] Harris H.C. & Canterna R. 1977, AJ, 82, 798.
- [37] Harris W.E. 1996, AJ, 112, 1487.

- [38] Harris W.E., van den Bergh S., 1981, *AJ*, 86, 1627.
- [39] Harris W.E., Whitmore B.C., Karakla D., et al. 2006, *ApJ*, 636, 90.
- [40] Haşegan M., Jordán A., Côté P., et al. 2005, *ApJ*, 627, 203.
- [41] Hau G.K.T., Spitler L.R., Forbes D.A., et al. 2009, *MNRAS*, 394, 97.
- [42] Hilker M. 2009, “Reviews in Modern Astronomy” of the Astron. Gesell., S.Roeser (ed), vol.21, en prensa (arXiv: 0906.0776)
- [43] Hilker M., Infante L., Vieira G., et al. 1999, *A&AS* 134, 75.
- [44] Huchra J. P., Brodie J. P., Kent S. M., 1991, *ApJ*, 370, 495.
- [45] Hopp U. & Materne J. 1985, *A&AS*, 61, 93.
- [46] Jordán A., McLaughlin D.E., Côté P. 2007, *ApJS*, 171, 101.
- [47] Karick A.M., Drinkwater M.J., Gregg M.D. 2003, *MNRAS*, 344, 188.
- [48] Larsen S.S. & Brodie J.P. 2003, *ApJ*, 593, 340.
- [49] Lee Y.W., Joo J.M., Sohn Y.J. et al. 1999, *Nature*, 402, 55L.
- [50] Lee H. C., Lee Y. W., Gibson B. K., 2003, in *Extragalactic Globular Cluster Systems*, ed. M. Kissler-Patig (Berlin: Springer), 261.
- [51] Ma J., de Grijs R., Fan Z. et al. 2009, *RAA*, 9, 641.
- [52] Mackey A.D. & van den Bergh S. 2005, *MNRAS*, 360, 631.
- [53] MacLaughlin D.E. & van der Marel R.P. 2005, *ApJ*, 161 304.
- [54] Maraston C., Bastian N., Saglia P.R., et al. 2004, *A&A*.
- [55] Meylan G., Sarajedini A., Jablonka P., et al. 2001, *AJ*, 122, 830.
- [56] Minniti D., Kissler-Patig M., Goudfrooij P., Meylan G. 1998, *AJ*, 115, 121.
- [57] Mieske S., Hilker M., Infante L. et al. 2006, *AJ*, 131, 2442.
- [58] Mieske S., Hilker M., Jordán A., et al. 2007, *A&A*, 472, 111.
- [59] Mieske S., Hilker M., Jordán A., et al. 2008, *A&A*, 487, 921.
- [60] Mieske S., Hilker M., Misgeld I. et al. 2009, *A&A*, 498, 705.

- [61] Misgeld I., Mieske S., Hilker M. 2008, *A&A*, 486, 697.
- [62] Nakasawa K. Makishima K., Fukasawa Y., Tamura T. 2000, *PASJ*, 52, 623.
- [63] Ostrov P.G., Forte J.C., Geisler D. 1998, *AJ*, 116, 2854.
- [64] Pedersen K., Yoshi Y., Sommer-Larsen J. 1997, *ApJ*, 485, L17.
- [65] Piotto G. 2009, “The Ages of Stars”, *Proceedings Simposio IAU 258*, p. 233.
- [66] Rejkuba M., Dubath P., Minniti D., Meylan G. 2007, *A&A*, 469, 147.
- [67] Richtler T., 2003, en *Lecture Notes in Physics Vol. 635*, “Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale”, eds. Alloin D., Gieren W., Springer, Berlin, p. 281.
- [68] Rieke G.H. & Lebofsky M.J. 1985, *ApJ*, 288, 618.
- [69] Schlegel D., Finkbeiner D., Davis M. 1998, *ApJ*, 500, 525.
- [70] Schuberth Y., Richtler T., Hilker M. et al. 2010, *A&A*, en prensa (arXiv: 0911.0420).
- [71] Smith Castelli A.V. 2008, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata.
- [72] Smith Castelli A.V., Bassino L.P., Richtler T., et al. 2008a, *MNRAS*, 386, 2311.
- [73] Smith Castelli A.V., Faifer F.R., Richtler T., Bassino L.P. 2008b, *MNRAS*, 391, 685.
- [74] Stetson P. 1987, *PASP*, 99, 191.
- [75] van Zee L., Barton E.J., Skillman E.D. 2004, *AJ*, 128, 2797.
- [76] Wehner E. M. H., Harris W. E. 2007, *ApJ*, 668, L35.
- [77] Whitmore B.C., Zhang Q., Leitherer C., et al 1999, *AJ*, 118, 1551.