



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA  
FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONÓMICAS Y GEOFÍSICAS

# Estudio de Galaxias de Bajo Brillo Superficial en el grupo Pegasus I a través de imágenes GEMINI

TESIS

para obtener el grado académico de:

**Doctora en Astronomía**

**Lic. Nélide M. González**

DIRECTORA:

Dra. Analía V. Smith Castelli

CO-DIRECTOR:

Dr. Sergio A. Cellone

CO-DIRECTOR DE LA BECA DOCTORAL UNLP:

Dr. Favio R. Faifer

La Plata, Argentina.

- SEPTIEMBRE DE 2023 -



ESTUDIO DE GALAXIAS DE BAJO BRILLO SUPERFICIAL EN EL GRUPO  
PEGASUS I A TRAVÉS DE IMÁGENES GEMINI

TESIS PRESENTADA EN CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORA EN ASTRONOMÍA

en la

FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONÓMICAS Y GEOFÍSICAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

**Por:** Nélica Mabel González

**Directora:** Dra. Analía V. Smith Castelli  
**Co-director:** Dr. Sergio A. Cellone  
**Co-director de Beca doctoral de la UNLP:** Dr. Favio R. Faifer

**Jurado:** Dr. Gustavo Luis Baume (FCAG - UNLP)

Dr. Ignacio Gargiulo (IALP)

Dra. Georgina Coldwell (UNSJ)

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas  
Universidad Nacional de La Plata  
Paseo del Bosque S/N  
(1900) La Plata  
Argentina

© Nélica Mabel González, 2023.



---

*A Liam y Ciro, a quienes deseo que tengan la misma oportunidad de estudiar en una Universidad pública, gratuita, inclusiva y de calidad...*



# Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial a mis directores Analía, Sergio y Favio por la dedicación, el apoyo, la infinita paciencia y principalmente por confiar en mí hasta cuando yo no lo hacía.

Al jurado, por su buena predisposición y dedicar su tiempo a la corrección de esta Tesis Doctoral.

A mis amigos por la comprensión, paciencia y el ánimo constante durante estos largos años.

A mis compañeros del grupo SEECC.

A la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, la Universidad Nacional de La Plata y al CONICET.

A todas aquellas personas que he conocido desde que inicie la carrera y que de alguna forma me han apoyado.

A mi querida Argentina.

Sin todo esto no hubiera sido posible alcanzar mi título de Doctora... ¡Gracias!



# Resumen

---

En esta Tesis Doctoral se presenta el estudio de las propiedades fotométricas de la población de galaxias de bajo brillo superficial (de aquí en más, galaxias LSB) ubicadas en la región central del grupo Pegasus I, dentro de  $\sim 0.3$  radios viriales. A partir de la inspección visual de imágenes obtenidas con los telescopios GEMINI, se identificaron once objetos difusos y extendidos con características morfológicas similares a galaxias LSB. Para cada uno de estos objetos, se obtuvieron los perfiles de brillo superficial mediante la tarea `ellipse` del paquete IRAF, y se realizaron ajustes a dichos perfiles, utilizando un modelo de Sérsic. A partir de los perfiles de brillo superficial medidos, para cada galaxia se obtuvieron los perfiles de color, magnitudes y colores integrados, radios efectivos y brillos superficiales efectivos medios. Los perfiles teóricos se integraron numéricamente hasta el infinito para calcular magnitudes totales, índices de Sérsic, y demás parámetros estructurales. Posteriormente, se analizaron diversos diagramas fotométricos que involucran a los parámetros obtenidos, y se compararon dichos parámetros con los presentados por objetos similares reportados en la literatura en otros medioambientes.

A partir del análisis de dichas comparaciones se observó una tendencia según la cual las galaxias LSB con tamaños lineales mayores eran preferentemente identificadas en grupos o cúmulos ubicados a mayores distancias, no reportándose allí objetos de tamaños lineales menores, similares, por ejemplo, a los de las galaxias enanas esferoidales (dSph) que son satélites de Andrómeda (M31) en el Grupo Local. La situación inversa parecía presentarse en cúmulos y grupos cercanos. Nos preguntamos si esta tendencia podría deberse a un sesgo en las identificaciones visuales que suele hacerse de las galaxias LSB.

Para evaluar esta posibilidad, y a partir de perfiles de brillos reportados en la literatura para algunos de los satélites de Andrómeda, modelamos la apariencia visual que tendrían estos objetos a la distancia de Pegasus I. Posteriormente, y mediante el software de detección y medición automática de objetos astronómicos SExtractor, realizamos una búsqueda en las imágenes de Pegasus I de objetos similares a los modelados. A partir de una minuciosa inspección visual de las galaxias detectadas por SExtractor que presentaban tamaños y colores en acuerdo con los de los objetos modelados, se identificó en Pegasus I un total de veintiún objetos candidatos a ser similares a los satélites de Andrómeda. Estos candidatos, además de presentar morfologías, tamaños y colores acordes a los esperados para los satélites de Andrómeda a la distancia de Pegasus I, muestran una distribución proyectada particular en torno a las galaxias dominantes del grupo que podría estar en concordancia con lo reportado para las galaxias satélites de la Vía Láctea y Andrómeda en el Grupo Local.



# Índice general

---

<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Galaxias de Bajo Brillo Superficial	1
1.2. Escenarios de formación	5
1.3. Pegasus I	6
1.4. Motivación de esta Tesis	10
<b>2. Datos Observacionales y Fotometría</b>	<b>11</b>
2.1. Observaciones	11
2.2. Sustracción del cielo e identificación de galaxias LSB	12
2.2.1. Campo 1	15
2.2.2. Campo 2	18
2.2.3. Campo 3	18
2.2.4. Campo 4	25
2.2.5. Campo 5	25
2.2.6. Campo 6	26
2.2.7. Campo 7	27
2.2.8. Campo 8	28
2.2.9. Campo Comparación	29
2.3. Obtención de parámetros fotométricos y estructurales de las galaxias LSB	30
2.3.1. Cálculo de los perfiles de brillo superficial	30
2.3.2. Calibración al Sistema Estándar	33
2.3.3. Cálculo de magnitudes y colores integrados, radios efectivos y brillos superficiales efectivos medios	34
2.3.4. Mapas y perfiles de color	34
2.3.5. Ajuste de los perfiles de brillo: Ley de Sérsic	36
<b>3. Análisis y resultados</b>	<b>39</b>
3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color	39
3.2. Comparación de magnitudes y radios efectivos	52
3.3. Diagramas Fotométricos	57
3.3.1. Diagrama color-magnitud	57
3.3.2. Diagrama $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$ -luminosidad	59
3.3.3. Relaciones del índice de Sérsic	62
3.4. Distribución Espacial	63
	<b>xi</b>

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>4. Galaxias análogas a las satélite de Andrómeda en Pegasus I?</b>	<b>69</b>
4.1. Introducción . . . . .	69
4.2. Selección de candidatas . . . . .	69
4.3. Datos fotométricos . . . . .	71
4.4. Identificación . . . . .	74
4.5. Diagramas Fotométricos de las Galaxias dSphs ultra-débiles . . . . .	80
4.6. Distribución espacial . . . . .	83
<b>5. Discusión y Conclusiones</b>	<b>87</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Malin 1 . . . . .	4
1.2. Enana esferoidal de Fornax . . . . .	4
1.3. Imagen de Pegasus I . . . . .	8
1.4. Mapa en rayos-X de Pegasus I. . . . .	9
2.1. Ubicación de los campos Gemini-GMOS en un mosaico SDSS. . . . .	13
2.2. Imagen en el filtro $r'$ del campo 1 del grupo de Pegasus I . . . . .	16
2.3. Sustracción del nivel de cielo en torno a la candidata PEG J232038+081046.9 . . . . .	17
2.4. Imagen en el filtro $r'$ del campo 2 del grupo de Pegasus I . . . . .	18
2.5. Parámetros de la tarea <code>geotran</code> de IRAF . . . . .	21
2.6. Ejemplo de transformación del campo 3 para aplicar la tarea <code>ellipse</code> . . . . .	21
2.7. Imagen en el filtro $r'$ del campo 3 del grupo de Pegasus I . . . . .	22
2.8. Proceso utilizado por SExtractor sobre el campo 3 . . . . .	23
2.9. Sustracción del nivel de cielo en torno a la candidata PEG J232023+081331.4 . . . . .	24
2.10. Imagen en el filtro $r'$ del campo 4 del grupo de Pegasus I . . . . .	25
2.11. Imagen en el filtro $r'$ del campo 5 del grupo de Pegasus I . . . . .	26
2.12. Imagen en el filtro $r'$ del campo 6 del grupo de Pegasus I . . . . .	27
2.13. Imagen en el filtro $r'$ del campo 7 del grupo de Pegasus I . . . . .	28
2.14. Imagen en el filtro $r'$ del campo 8 del grupo de Pegasus I . . . . .	29
2.15. Sustracción del nivel de cielo en torno a la candidata PEG J232055+080022.9 . . . . .	31
2.16. Imagen en el filtro $r'$ del campo de comparación del grupo de Pegasus I . . . . .	32
3.1. Figuras correspondientes a la candidata PEG J231956+081253.7 . . . . .	41
3.2. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232023+081331.4 . . . . .	42
3.3. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232024+081209.0 . . . . .	43
3.4. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232037+080934.3 . . . . .	44
3.5. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232037+081336.6 . . . . .	45
3.6. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232038+081046.9 . . . . .	46
3.7. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232049+080806.3 . . . . .	47
3.8. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232054+080838.8 . . . . .	48
3.9. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232036+080358.2 . . . . .	49
3.10. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232040+075951.9 . . . . .	50
3.11. Figuras correspondientes a la candidata PEG J232055+080022.9 . . . . .	51
3.12. Comparación de las magnitudes obtenidas con <code>ellipse</code> y el ajuste de Sérsic . . . . .	53
3.13. Comparación de los $r_{\text{eff}}$ obtenidos con <code>ellipse</code> y el ajuste de Sérsic . . . . .	53
3.14. DCM de las LSB de Pegasus I . . . . .	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.15. Diagrama $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$ -luminosidad de las LSB de Pegasus I . . . . .	60
3.16. Relación entre el radio efectivo de las diferentes muestras de LSB y sus distancias (vertical) . . . . .	61
3.17. Relación entre el índice de Sérsic $n$ vs. $M_g$ de las LSB de Pegasus I . . . . .	63
3.18. Distribución espacial de las candidatas LSB en un mosaico SDSS. . . . .	65
3.19. Distribución espacial en función de los colores $(g' - r')_0$ de todas las LSB y UDGs detectadas en Pegasus I. . . . .	66
3.20. DC- $R_{\text{eff}}$ de las LSB de Pegasus I . . . . .	67
4.1. Las dSphs de Andrómeda a la distancia de Pegasus I . . . . .	70
4.2. Comparación entre las LSBs de Pegasus I y las dSphs Andrómeda . . . . .	73
4.3. Candidatas seguras a dSphs ultra débiles . . . . .	75
4.4. Candidatas posibles a dSphs ultra débiles . . . . .	76
4.5. Candidatas descartadas a dSphs ultra débiles . . . . .	78
4.6. DCM de las dSphs ultra débiles de Pegasus I . . . . .	81
4.7. Diagrama $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$ -luminosidad de las dSphs ultra débiles de Pegasus I . . . . .	82
4.8. Distribución espacial de las candidatas dSphs ultra débiles en un mosaico SDSS. . . . .	84
4.9. Distribución espacial en función de los colores $(g' - r')_0$ y $(g' - i')_0$ de todas las LSB, UDGs y dSphs ultra débiles detectadas en Pegasus I. . . . .	85
4.10. Relación entre los colores vs. el cociente entre la distancia radial y el radio virial a NGC 7626 de todas las LSB, UDGs y dSphs ultra débiles detectadas en Pegasus I. . . . .	86

# Índice de tablas

---

1.1. Información de Pegasus I (continuación) . . . . .	7
1.2. Información de Pegasus I . . . . .	7
2.1. Detalle de las observaciones de Pegasus I . . . . .	15
2.2. Coeficientes para cada filtro para Pegasus I . . . . .	34
3.1. Parámetros derivados de las candidatas LSB del grupo de Pegasus I . .	55
3.2. Parámetros de Sérsic de las candidatas LSB del grupo de Pegasus I . .	56



### 1.1. Galaxias de Bajo Brillo Superficial

Desde hace varias décadas se sabe que algunas galaxias presentan un brillo superficial mucho más débil que el de las galaxias clásicas (elípticas y espirales). Por ejemplo, utilizando el catálogo ESO/Uppsala (Lauberts & Valentijn 1989), Davies et al. (1994) reportan que las muestras de galaxias construidas considerando límites de magnitud y tamaño se encuentran sesgadas al no incluir en ellas a las galaxias de bajo brillo superficial debido a los límites de profundidad de las observaciones. Históricamente, todas las galaxias con brillo superficial central en la banda  $B$  ( $\mu_{0,B}$ ) mayor a  $23 \text{ mag arcsec}^{-2}$  se consideran galaxias de bajo brillo superficial (LSB, por sus siglas en inglés) (Impey & Bothun 1997), siendo este brillo tres veces más débil que el valor medio reportado para galaxias “normales”<sup>1</sup> y, aproximadamente, dos veces más débil que el brillo del cielo nocturno<sup>2</sup>. Sin embargo, esta definición resulta ser relativamente amplia si se tiene en cuenta que abarca tanto a galaxias del tamaño de la Vía Láctea como a los satélites más pequeños de la Vía Láctea, las galaxias enanas esferoidales (dSph, por sus siglas en inglés).

Disney (1976) predice la existencia de las galaxias LSB y las primeras de ellas se identifican recién a finales de la década de 1980 (Bothun et al. 1987; Impey et al. 1988). Los primeros estudios con mediciones fotométricas detalladas de las galaxias LSB se concentran principalmente en galaxias relativamente masivas (Romanishin et al. 1983; Bothun et al. 1985; Impey & Bothun 1989; Bothun et al. 1990; Sprayberry et al. 1995). El ejemplo más conocido de estas galaxias LSB gigantes es Malin 1 (ver Figura 1.1) que fue descubierta accidentalmente por Bothun et al. (1987), cuyo disco presenta un brillo superficial central  $\mu_g \gtrsim 26 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (Boissier et al. 2016) a una distancia de  $\sim 377 \text{ Mpc}$  (Lelli et al. 2010), reportándose como extremadamente rica en HI, y mostrando un asombroso diámetro de  $160 \text{ kpc}$  lo que la convierte en la galaxia espiral más grande y difusa observada hasta el momento (Galaz et al. 2015). Con una magnitud absoluta  $M_V = -22.9 \text{ mag}$  (Pickering et al. 1997), las galaxias tipo Malin I representan una clase interesante de objetos en términos de los procesos de evolución de las galaxias, ya que aún no se comprende cómo han logrado incrementar tanto su masa sin aumentar su brillo superficial. Se ha propuesto que la existencia de tales galaxias LSB gigantes es el resultado de un alto momento angular y una baja tasa de formación estelar (Jimenez et al. 1998).

---

<sup>1</sup>Brillo superficial central para galaxias “normales”  $\mu_{0,B} = 21.7 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (Ley de Freeman).

<sup>2</sup>Brillo superficial del cielo nocturno  $\mu_{0,B} = 22.7 \text{ mag arcsec}^{-2}$ .

## 1. Introducción

---

A fines de la década de 1980, los grandes catálogos de galaxias en base a relevamientos fotográficos en los cúmulos de Virgo (Binggeli et al. 1985) y Fornax (Ferguson 1989) incluían también muchas galaxias enanas LSB ( $M_B > -18$  mag o  $M_{r'} \gtrsim -19$  mag), que aumentaron en gran medida el número de galaxias LSB conocidas. Davies et al. (1988) presentan la fotometría automatizada en el cúmulo de Fornax que permitió el análisis detallado de galaxias enanas en estas muestras. Estudios posteriores, como los de Davies et al. (1990) o Sabatini et al. (2005), mostraron que las galaxias enanas LSB en realidad representan una fracción significativa de objetos en el extremo débil de la función de luminosidad. La mayoría de estas galaxias se encontraron en cúmulos. En efecto, se ha estimado que las galaxias con un brillo superficial central de  $\mu_{0,V} = 22 - 25$  mag arcsec<sup>-2</sup> pueden representar hasta el 50 % de la población total de las galaxias existentes (Impey & Bothun 1997).

Solo recientemente, y gracias a los nuevos instrumentos de gran campo que utilizan mosaicos de CCDs, como MegaCAM (Boulade et al. 1998), OmegaCAM (Kuijken et al. 2002), Suprime-Cam (Miyazaki et al. 2002) y DECam (Flaugher et al. 2015), se han podido realizar relevamientos multibanda con un límite de brillo superficial  $\mu_V \sim 28$  mag arcsec<sup>-2</sup>, sobre grandes áreas del cielo. De hecho, nuevos relevamientos de imágenes como el *Next Generation Virgo Survey* (Ferrarese et al. 2012) revelaron una gran cantidad de galaxias de bajo brillo superficial en el Universo cercano. Aunque los instrumentos de campo amplio conectados a grandes telescopios demostraron una gran versatilidad para la detección de galaxias LSB al realizar estudios profundos, otros enfoques diferentes también demostraron su eficacia en ese sentido. Por ejemplo, uno de tales enfoques lo constituye el relevamiento que utilizó el telescopio Dragonfly (Abraham & van Dokkum 2014), que consiste en un arreglo de teleobjetivos, y fue utilizado en el trabajo de van Dokkum et al. (2015) donde se reporta una gran cantidad de galaxias LSB extendidas en el cúmulo de Coma, a las que llamaron Galaxias Ultra Difusas (UDGs, por sus siglas en inglés).

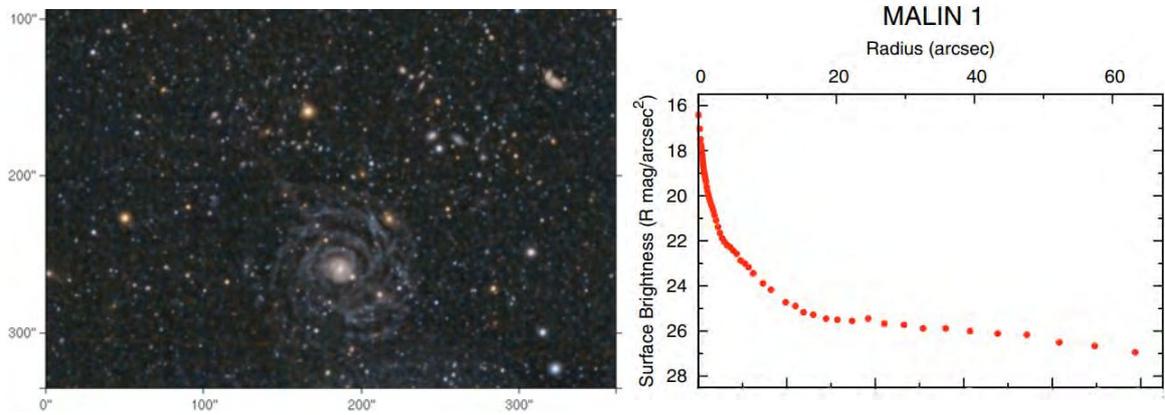
Las UDGs descubiertas por van Dokkum et al. (2015) son galaxias de extremadamente bajo brillo superficial central  $\mu_{g'} \gtrsim 24$  mag arcsec<sup>-2</sup> y son más extendidas que las enanas de tipo temprano clásicas, presentando  $r_{\text{eff}} \gtrsim 1.5$  kpc. Las UDGs tienen tamaños comparables a la Vía Láctea, pero son varios órdenes de magnitudes más débiles, comparables a las galaxias enanas. Estas UDGs se caracterizan por tener poblaciones estelares viejas masas estelares de  $10^7 - 10^8 M_{\odot}$  y perfiles de brillo exponenciales similares a las galaxias elípticas enanas típicas de baja masa. La denominación particular que se les asigna no implica que estos objetos sean distintos a la población general de galaxias de bajo brillo superficial, sino que simplemente presentan tamaños mayores y son más difusos. En una primera instancia se consideraba que los cúmulos ricos eran los lugares naturales para encontrar UDGs, ya que algunos de los trabajos que respaldaban esa idea se centraban en Fornax (Muñoz et al. 2015), Coma (Koda et al. 2015; van Dokkum et al. 2015) y Virgo (Mihos et al. 2015; Davies et al. 2016). Otros grupos más distantes en los que se han reportado UDGs son Pegasus II (Shi et al. 2017) y Abell 168 (Román & Trujillo 2017a). Sin embargo, también se han reportado UDGs en grupos compactos como HCG 07/25/98 (Román & Trujillo 2017b), M 101 (Merritt et al. 2016), HCG 44 (Smith Castelli et al. 2016) y Leo-I (Müller et al. 2018), esto es, fuera de los cúmulos ricos, mostrando que las UDGs se pueden encontrar en diferentes medioambientes.

Visualmente y estructuralmente, las galaxias UDGs son similares a las dSphs como las que se encuentran en el Grupo Local, alrededor de M101 y en los cúmulos de Virgo y Coma. Sin embargo, el término “enana” no es apropiado para estos objetos tan extendidos.

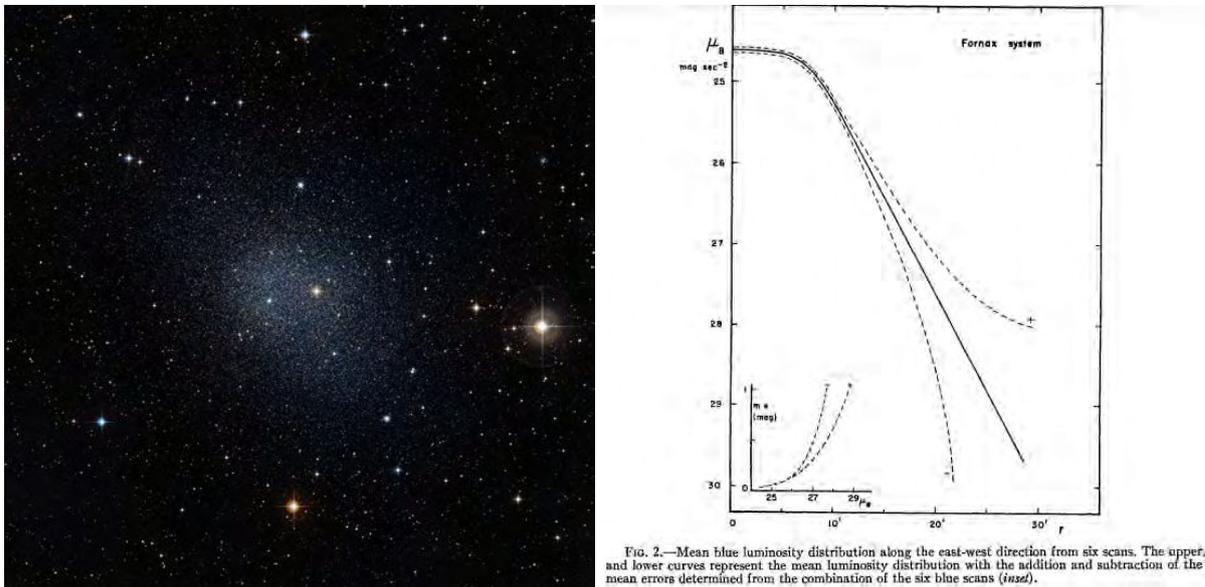
Por su parte, las dSphs son de los objetos más abundantes del Universo (Mateo 1998; Metz & Kroupa 2007). Como su nombre lo indica, las dSphs son galaxias pequeñas, no muestran formación estelar y presencia de gas en forma evidente, lo cual dificulta su detección, y su principal característica es la de presentar brillos superficiales centrales extremadamente bajos ( $\mu_{0V} > 24$  mag arcsec<sup>-2</sup>, McConnachie 2012). Las dSphs tienen tamaños típicos de unos pocos cientos de pársecs (por ejemplo, McConnachie 2012; Lieder et al. 2012), y en el Grupo Local y otros grupos cercanos sólo unas pocas tienen un radio efectivo superior a 1 kpc (por ejemplo, Kim et al. 2011; McConnachie 2012; Chiboucas et al. 2013; Merritt et al. 2014). Su bajo número de estrellas las hace muy débiles, presentando magnitudes absolutas entre  $-13 \leq M_V \leq -7$  mag (Mateo 1998; Belokurov et al. 2007), lo que las hace difíciles de detectar (Tollerud et al. 2008); aproximadamente el 50 % de ellas están catalogadas como satélites de la Vía Láctea (McConnachie 2012; Koposov et al. 2015; Newton et al. 2018). A modo ilustrativo, se muestra en la Figura 1.2 (panel izquierdo) uno de los satélites de la Vía Láctea: la galaxia enana esferoidal Fornax. Se puede apreciar que muestra una morfología difusa y extendida. En la Figura 1.2 (panel derecho) se muestra otra característica importante de este tipo de galaxias que es la suave variación en su perfil de brillo superficial, donde el índice de Sérsic es  $n \lesssim 1$  para galaxias de tipo temprano de acuerdo con lo encontrado por distintos autores, entre ellos los trabajos de Cellone et al. (1994) y Buzzoni et al. (2012). Esto, junto con la ausencia casi total de gas y la prácticamente nula formación estelar, las diferencia claramente de otras galaxias enanas de tipos más tardíos como espirales, compactas azules (BCDs) o irregulares (dIrrs).

Las dSph, por su parte, exhiben altas relaciones de masa-luminosidad ( $M/L$ ) de entre 10 y 10000, y se cree que son sistemas estelares dominados por materia oscura (DM, por sus siglas en inglés) (Collins et al. 2014). Se encuentran entre las estructuras más antiguas del Universo. En los modelos jerárquicos de formación de galaxias, las galaxias enanas son los sistemas elementales del Universo, esto es, las galaxias más grandes se forman a partir de objetos más pequeños, como las galaxias enanas, a través de fusiones mayores y/o menores. Por lo tanto, es importante estudiar estas galaxias para comprender la formación y evolución de las galaxias de tamaño normal.

# 1. Introducción



**Figura 1.1.** Panel izquierdo: imagen óptica profunda de Malin 1, la galaxia espiral más grande y difusa observada hasta el momento, obtenida con el telescopio Magallanes del Observatorio Las Campanas, Chile (Galaz et al. 2015). Panel derecho: perfil de brillo superficial en la banda  $R$  de la galaxia Malin 1 (Lelli et al. 2010).



**Fig. 2.**—Mean blue luminosity distribution along the east-west direction from six scans. The upper and lower curves represent the mean luminosity distribution with the addition and subtraction of the mean errors determined from the combination of the six blue scans (1952).

**Figura 1.2.** Panel izquierdo: imagen de la enana esferoidal (dSph) Fornax. *Crédito: ESO/Digitized Sky Survey 2*. Panel derecho: perfil de brillo superficial en la banda  $B$  de la enana esferoidal Fornax (de Vaucouleurs & Ables 1968). El perfil de brillo superficial de una galaxia dSph decae suavemente con el radio.

## 1.2. Escenarios de formación

Hay varios modelos que intentan explicar el origen de las galaxias dSph al considerar diferentes mecanismos. Algunos de ellos se basan en las mareas y el barrido por presión cinética (*ram-pressure stripping*) (Mayer et al. 2007). En estos modelos, las galaxias dSph se forman debido a la interacción entre una galaxia enana irregular soportada rotacionalmente y una galaxia anfitriona del tamaño de la Vía Láctea. Estos modelos muestran que las galaxias dSph tienden a aparecer cerca de galaxias masivas, pero no explican la presencia de galaxias dSph distantes y aisladas, como Tucana y Cetus.

El modelo propuesto por D’Onghia et al. (2009) considera un mecanismo conocido como *stripping* resonante y se puede usar para explicar la formación de galaxias dSph aisladas. Básicamente, estos objetos se forman después de los encuentros entre galaxias de disco enanas, en un proceso impulsado por resonancias gravitacionales.

Otro modelo dado por Alarcón Jara et al. (2018) plantea un escenario de disolución de cúmulos estelares propuesto por Assmann et al. (2013a) y Assmann et al. (2013b). De acuerdo con este modelo, una galaxia dSph está formada por la fusión y disolución de varios cúmulos estelares con baja eficiencia de formación estelar, formados dentro de un pequeño halo de DM, que más tarde albergará a la galaxia dSph. Este modelo no necesita la interacción gravitacional con otras galaxias para explicar la formación de dSph y, por lo tanto, se puede usar para explicar la formación de galaxias dSph aisladas.

Con respecto a las dSph del Grupo Local, algo interesante a destacar es que Metz & Kroupa (2007) mostraron que los modelos jerárquicos de formación de galaxias no reproducen los planos orbitales definidos por los satélites de la Vía Láctea y Andrómeda (Pawlowski et al. 2013). Dabringhausen & Kroupa (2013), por su parte, plantean que las galaxias LSB pueden tener un origen primordial y estar, por lo tanto, dominadas por DM o, por el contrario, generarse a partir de fuerzas tidales. En este contexto, se plantea la posibilidad de que las galaxias dSph que son satélites de la Vía Láctea y Andrómeda no se encuentren dominados por DM y que tengan, en consecuencia, un origen tidal.

Todavía no está claro si las UDGs y las dSph pertenecen a la misma familia de galaxias de las enanas elípticas (dEs, Conselice 2018) y comparten caminos evolutivos similares o si representan diferentes tipos de objetos con diferentes escenarios de formación. Por el momento, en el caso de las UDGs, las observaciones han conducido a la postulación de diversos escenarios. Por ejemplo, van Dokkum et al. (2015) sugirieron que las UDGs pueden ser galaxias “fallidas”, que perdieron su gas después de la primera generación de estrellas y que están fuertemente dominadas por MD. Este escenario también parece estar de acuerdo con la dispersión de velocidades reportada para la UDG Dragonfly 44 en el cúmulo e Coma (van Dokkum et al. 2016). En esa misma dirección, la evidencia de alta abundancia de cúmulos globulares en la UDG Dragonfly 17 respalda la idea de que puede ser una galaxia fallida con una masa del halo similar a la Nube Mayor de Magallanes (Beasley & Trujillo 2016).

Desde la perspectiva teórica, Amorisco & Loeb (2016) afirmaron que las UDGs pueden explicarse fácilmente mediante un modelo estándar de formación de discos, sugiriendo que las UDGs son galaxias enanas con un momento angular original especialmente alto. En este escenario, el alto momento angular hace que las UDGs sean más

planas y extendidas que las típicas dEs. En esa misma dirección, [Rong et al. \(2017\)](#) a través de las simulaciones numéricas *Millennium* y *Phoenix* de grandes cúmulos de galaxias, muestran que las UDGs son galaxias enanas genuinas que naturalmente pueden surgir de los modelos  $\Lambda$ CMD (por sus siglas en inglés: *Lambda-Cold Dark Matter*) reproduciendo muy bien las propiedades observadas en las cercanías de cúmulos. Por otro lado, la existencia de UDGs en el campo ha sido propuesta teóricamente por [Di Cintio et al. \(2017\)](#), que utilizando simulaciones cosmológicas del proyecto *Numerical Investigation of a Hundred Astrophysical Objects* (NIHAO) muestran que las UDGs se forman naturalmente en halos enanos debido a episodios de pérdida de gas asociados con la formación estelar. Otra hipótesis, presentada por [Baushev \(2018\)](#), sugiere que las UDGs pueden formarse como resultado de una colisión de galaxias. Esto se produce si las galaxias son jóvenes y contienen gran cantidad de gas, de modo tal que, al colisionar, pueden expulsar todo el gas del sistema y así reprimir la formación estelar, resultando en objetos con un muy bajo brillo superficial.

### 1.3. Pegasus I

La “nube de nebulosas” que se extiende a través de la constelación de Pegasus (Pegasus I; [Zwicky 1942](#); [Zwicky et al. 1965](#)) fue inicialmente reportada como un “grupo medio compacto con diámetro angular de 6.3 grados”, conteniendo  $\sim 30$  miembros confirmados, con un número similar de galaxias espirales y de tipo temprano abarcando un rango de velocidad radial de  $2500 - 5500 \text{ km s}^{-1}$  ([Chincarini & Rood 1976](#); [Aaronson et al. 1980](#), y referencias allí citadas). En la Figura 1.3 se muestra una imagen del *Palomar Observatory Sky Survey II* de la región de Pegasus I. A partir de un estudio en HI de 80 galaxias en la región de Pegasus I, [Richter & Huchtmeier \(1982\)](#) incrementaron el número de miembros confirmados a 75 galaxias brillantes ubicadas a 51.8 Mpc, con una velocidad radial media de  $3885 \text{ km s}^{-1}$  y una dispersión de velocidades de  $236 \text{ km s}^{-1}$ . Esta distancia es coherente con el valor de 53 Mpc obtenido más recientemente por [Tonry et al. \(2001\)](#) mediante la aplicación del método de fluctuaciones de brillo superficial.

El grupo Pegasus I está dominado por dos galaxias elípticas gigantes de luminosidad similar: NGC 7616 ( $V = 11.06 \text{ mag}$ ) y NGC 7626 ( $V = 11.08 \text{ mag}$ ) ([de Vaucouleurs et al. 1992](#)). Ambas galaxias son fuentes de radio y muestran peculiaridades morfológicas. En particular, NGC 7626 presenta lóbulos con radio-jets a cada lado de su núcleo central, caparazones interiores y exteriores, una línea de polvo nuclear, y una fuente compacta de rayos-X en su centro, entre otras características ([Birkinshaw & Davies 1985](#); [Jedrzejewski & Schechter 1988](#); [Balcells & Carter 1993](#); [Trinchieri et al. 1997](#)). Por su parte, NGC 7619 es una fuente intensa y extendida de rayos-X con una larga cola asimétrica de rayos-X en la dirección suroeste ([Kim et al. 2008](#); [Randall et al. 2009](#)) que se piensa se debe a la caída de ésta hacia Pegasus I (ver Tabla 1.2 y Figura 1.4). Además, frentes fríos detectados en cada una de estas galaxias dominantes usando imágenes *Chandra* ([Kim et al. 2008](#); [Randall et al. 2009](#)) apoyan el escenario de una gran fusión de los dos subgrupos. Es importante notar que se ha reportado anteriormente que Pegasus I presenta un exceso de galaxias de tipo temprano con formación de estrellas en sus regiones externas, similar a los grupos *Butcher-Oemler* ([Vigroux et al. 1989](#); [Trentham 1997](#)). Dicho exceso puede asociarse con la caída de esas galaxias hacia

Pegasus I, lo cual indicaría que es un grupo en formación (ver [Fujita 2003](#)).

[Canizares et al. \(1986\)](#) reportaron una densidad de gas intergaláctico de  $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$  para Pegasus I, haciéndolo uno de los grupos de galaxias menos densos. Debido a esto, y a la baja dispersión de velocidades, no se espera que el proceso de *ram-pressure stripping* juegue un rol fundamental en la evolución de sus galaxias. Sin embargo, [Levy et al. \(2007\)](#) encontraron que, aunque no es tan intensa como en otros grupos, existe reducción de gas en un número significativo de galaxias de tipo tardío. Esto indicaría que la interacción entre el medio interestelar y el medio intragrupo puede estar jugando un papel importante en Pegasus I.

La población de galaxias del grupo Pegasus I ha sido poco estudiada. [Vader & Chaboyer \(1994\)](#) presentaron fotometría superficial de siete galaxias ubicadas en las cercanías de NGC 7626, que muestran morfología de enanas, pero sin información de velocidad radial. Unos pocos años después, [Trentham \(1997\)](#) intentó determinar la parte débil de la función de luminosidad en Pegasus I. Sin embargo, la baja densidad galáctica en el campo de estudio resultó en una pequeña cantidad de objetos con brillo mayor a  $M_R = -11$  mag, dejando la función de luminosidad del grupo sin definir por completo. Posteriormente, utilizando un algoritmo de tipo *friend-of-friends*, [Ramella et al. \(2002\)](#) identificaron a Pegasus I como una asociación física con 13 miembros confirmados espectroscópicamente. Más recientemente, [Shi et al. \(2017\)](#) identificaron 44 galaxias LSB en Pegasus I. Si se considera que estas galaxias son miembros reales de Pegasus I, al ubicarlas a la distancia del grupo, 12 de ellas satisfarían el criterio de presentar un  $r_{\text{eff}} \gtrsim 1.5$  kpc, lo cual las convertiría en UDGs de Pegasus I.

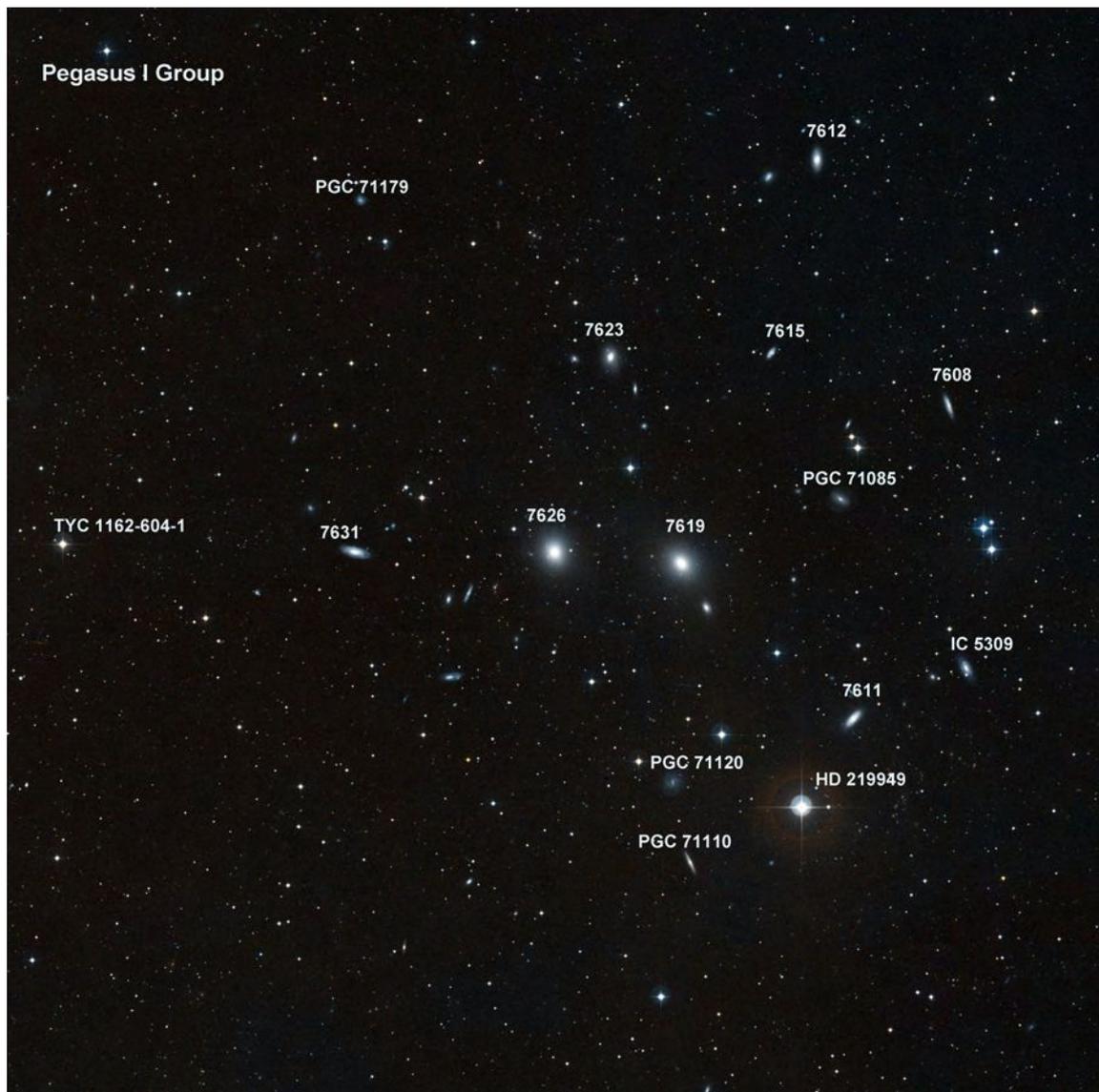
**Tabla 1.1.** Información de las galaxias dominantes de Pegasus I.

Galaxia	$M_v$	Tipo (NED)	Masa $M_{\odot}$	Brillo en Rayos-X ( $\text{ergs s}^{-1}$ )	Referencia
NGC 7626	-22.87	E	$3 \times 10^{13}$	$4.3 \times 10^{41}$	<a href="#">Randall et al. (2009)</a>
NGC 7619	-22.94	E	$5 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{41}$	<a href="#">Randall et al. (2009)</a>

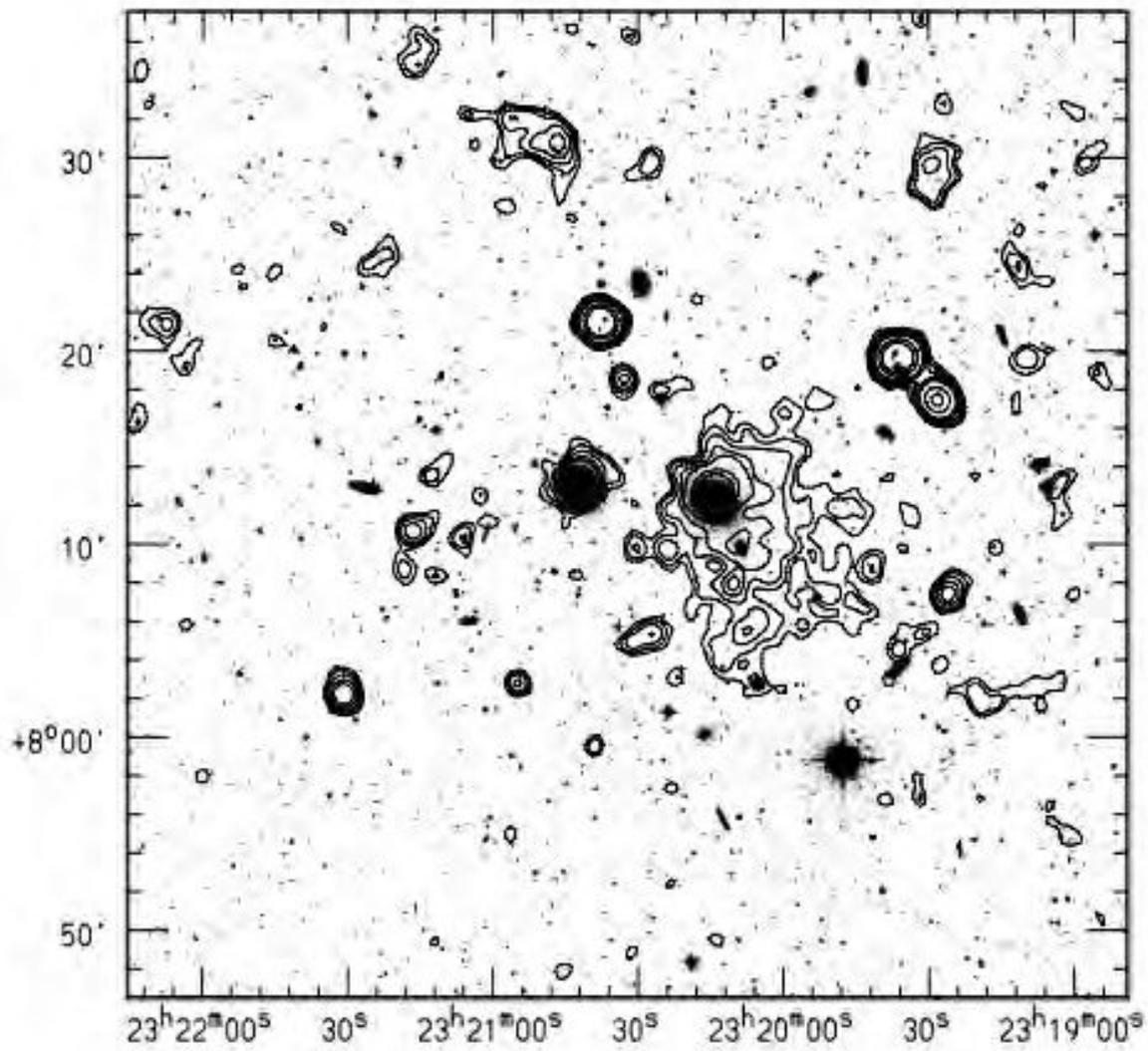
**Tabla 1.2.** Información de las distancias de las galaxias dominantes de Pegasus I.

Galaxia	R.A. (J2000)	DEC (J2000)	$(m - M)$ (mag)	Distancia (Mpc)	Método	$H_0$ ( $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ )	Referencia
NGC 7619	23:20:14.5	08:12:22	33.70	55.0	SBF	74.4	<a href="#">Tully et al. (2013)</a>
NGC 7626	23:20:42.5	08:13:01	33.34	46.6	SBF	74.4	<a href="#">Tully et al. (2013)</a>

SBF: Fluctuaciones de brillo superficial



**Figura 1.3.** Imagen del grupo de Pegasus I del *Palomar Observatory Sky Survey II*.



**Figura 1.4.** Mapa de rayos-X del grupo Pegasus I superpuesto a la imagen óptica del *Digitized Sky Survey*, suavizado con una función gaussiana con  $\sigma = 22''.5$  [Trinchieri et al. \(1997\)](#)

### 1.4. Motivación de esta Tesis

Entre los años 2008 y 2015, varios integrantes del grupo de investigación en *Sistemas Estelares Extragalácticos* y su Contexto Cosmológico (SEECC) de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, y del Instituto de Astrofísica de La Plata, han obtenido imágenes del grupo Pegasus I mediante la utilización de los telescopios Gemini, con el fin de estudiar la población de galaxias y los sistemas de cúmulos globulares de dicho entorno. Una ventaja que presenta el grupo Pegasus I a la hora de obtener datos con los telescopios gemelos Gemini es que, por sus coordenadas, Pegasus I puede ser observado tanto desde el Hemisferio Sur como desde el Hemisferio Norte, y en ambos semestres. Esto ha permitido obtener un conjunto de imágenes de excelente calidad que cubren adecuadamente la región central de dicho grupo en un lapso de 6 semestres.

Dado el creciente interés por parte de la comunidad astronómica internacional en el estudio de las galaxias LSB, relacionado a la relevancia que han mostrado tener estos objetos para la comprensión de la formación y evolución de las galaxias en general, se decidió que el primer paso en el estudio de Pegasus I estaría enfocado en la identificación y análisis de este tipo de objetos. La utilización de telescopios de gran diámetro como ser los telescopios Gemini, se torna indispensable para encarar el estudio de las galaxias LSB dada la baja luminosidad que estas presentan. Tal es así que aún resulta extremadamente dificultosa la obtención de espectros de relación señal-ruido (S/N) adecuada para realizar algún tipo de análisis espectroscópico en lo que a cinemática o abundancias se refiere, e, incluso, para la determinación de velocidades radiales.

En tal contexto, los estudios fotométricos detallados de las galaxias LSB resultan ser, por el momento, la herramienta más relevante para poder caracterizar sus propiedades y, a partir de ellas, establecer posibles caminos evolutivos así como la posible vinculación de estas galaxias con las de otros tipos morfológicos, si la hubiera. Tal análisis en un entorno como el de Pegasus I aporta, además, a la discusión relacionada con el origen de las galaxias LSB. Esto es, a determinar si las galaxias LSB tienen un origen primordial o son el resultado de las interacciones entre galaxias de mayor masa.

---

## Capítulo 2

# Datos Observacionales y Fotometría

---

## 2.1. Observaciones

Este trabajo está basado en datos de ocho campos profundos y un campo de comparación. Todos ellos adquiridos en las bandas  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  del sistema fotométrico del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS, Fukugita et al. 1996), empleando la cámara *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS, Hook et al. 2004) montada en el telescopio de 8.1 metros de Gemini Norte ubicado en Mauna Kea, Hawaii, durante los semestres de 2008B, 2012A, 2012B, 2014A, 2014B y 2015B. Estas observaciones son parte de un estudio en curso de la población de cúmulos globulares en la región central de Pegasus I con los telescopios Gemini (Faifer et al., en preparación). Estas imágenes cubren el entorno cercano a NGC 7619 y NCG 7626, dentro de  $\sim 0.3$  radios viriales ( $R_{\text{vir}}$ ), y se utilizaron para obtener los parámetros fotométricos de once objetos difusos y extendidos con características morfológicas similares a galaxias LSB, además de los correspondientes a un conjunto de galaxias cuyas morfologías resultan similares a las esperadas para las galaxias satélites de Andrómeda a la distancia de Pegasus I. La Figura 2.1 muestra la orientación de los diferentes campos GMOS analizados, superpuestos sobre una imagen perteneciente al *Digitized Sky Survey* (DSS) en la región central de Pegasus I.

La cámara de GMOS estaba integrada al momento de las observaciones por tres CCDs de  $2048 \times 4608$  píxeles cada uno ( $6144 \times 4608$  píxeles en total), separados por dos brechas o *gaps* de  $\sim 2.8$  arcsec, una escala de  $0.0727$  arcsec  $\text{píxel}^{-1}$  y un campo de visión (FOV) de  $5.5 \times 5.5$  arcmin. Las imágenes fueron obtenidas empleando un *binning* de  $2 \times 2$ , lo cual produce una escala de  $0.146$  arcsec  $\text{píxel}^{-1}$ . La Tabla 2.1 detalla la información relacionada con las imágenes Gemini-GMOS. Se realizó un proceso de *dithering* espacial entre las exposiciones individuales para recuperar las regiones entre los *gaps* y facilitar la eliminación de los rayos cósmicos. La reducción de los datos se realizó en dos etapas, primero corrigiéndolos por *bias* y *flats* utilizando tareas específicas de Gemini-GMOS dentro de IRAF<sup>1</sup>: `gbias`, `gflat` y `gireduce`. En una segunda etapa, se aplicaron las tareas `gmosaic` e `imcoadd`. Las imágenes *bias* y *flats* se descargaron del *Gemini Science Archive* (GSA).

Como los datos utilizados en esta tesis se obtuvieron durante varios semestres se observaron algunos campos con los CCDs GMOS-N E2V DD antes de su reemplazo por los CCD de Hamamatsu, mostrando así fuertes patrones de *fringing* que afectan a las imágenes cuando se usan filtros en el rojo o IR cercano (filtro  $i'$  en este caso). Estos

---

<sup>1</sup>IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) es distribuido por NOAO, el cual es operado por AURA, bajo un acuerdo de cooperación con la NSF de EE. UU.

patrones se eliminaron dentro de la primera etapa de reducción, creando y restando el patrón de *fringing* utilizando las tareas `gfringe` y `girmfringe`. El proceso de reducción de las imágenes explicado hasta ahora lo han realizado el Dr. Carlos Escudero y el Dr. Favio Faifer.

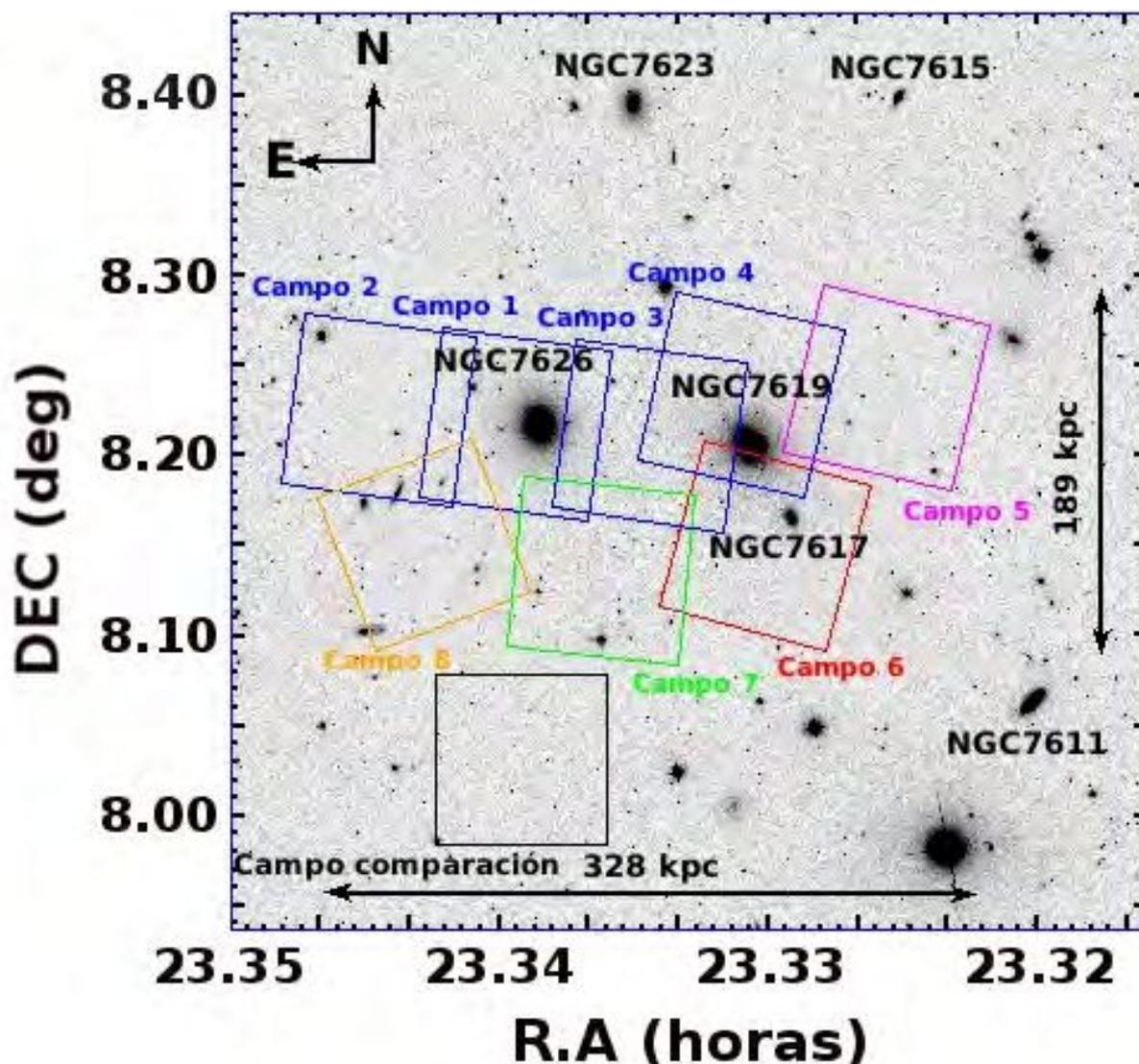
Un paso importante al finalizar la reducción de las imágenes consiste en la alineación de las imágenes correspondientes a un mismo campo del cielo, ya que éstas sufren pequeñas variaciones espaciales debido a los desplazamientos en el guiado del telescopio entre la obtención de cada imagen. Por lo tanto, las imágenes combinadas en los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  presentan campos de visión de dimensiones ligeramente distintas. La alineación de las imágenes permite corregir estas diferencias, favoreciendo la posterior comparación entre los objetos detectados en los diferentes filtros. Este procedimiento tiene como resultado tres imágenes que coinciden tanto en el campo de visión como en el sistema de referencia (en unidades de píxeles), donde los errores en la transformación no deben ser superiores a 0.5 píxeles.

El proceso de alineación de las imágenes se realizó utilizando las tareas `geomap` y `geotran` del paquete `immatch` de IRAF. En el primer paso se tomaron las coordenadas  $(x,y)$  de unos ochenta objetos puntuales, brillantes y no saturados, distribuidos de manera homogénea en toda la imagen  $r'$ , y las coordenadas de los mismos objetos en sus correspondientes imágenes  $g'$  e  $i'$ , para encontrar la transformación geométrica entre los distintos filtros utilizando la tarea `geomap`. En el segundo paso y con la transformación obtenida, se aplica la tarea `geotran` sobre las imágenes, obteniendo nuevas imágenes correctamente alineadas entre sí. Dicha alineación es importante para calcular los colores de cualquier tipo de fuente (puntual o extendida). En todos los casos se eligió como imagen de referencia la correspondiente al filtro  $r'$ , debido a que dicha imagen presenta la mejor relación señal/ruido de las fuentes puntuales.

## 2.2. Sustracción del cielo e identificación de galaxias LSB

A partir de una inspección visual en las imágenes Gemini-GMOS, se identificaron once objetos difusos y extendidos con características morfológicas similares a galaxias LSB (ver Tabla 3.1 y Figura 3.18). Para obtener sus perfiles de brillo y sus parámetros fotométricos, se debió sustraer la contribución del cielo a las imágenes. Es importante tener en cuenta que el brillo superficial promedio del cielo en nuestras imágenes es  $\mu_{\text{cielo},g'} \simeq 22 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ,  $\mu_{\text{cielo},r'} \simeq 21 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ,  $\mu_{\text{cielo},i'} \simeq 20 \text{ mag arcsec}^{-2}$ , mientras que los objetos de nuestro estudio muestran un brillo superficial central mucho más débil que estos valores ( $\mu_{g'} \gtrsim 25 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ). Por lo tanto, para obtener parámetros fotométricos y estructurales confiables, es necesario realizar un cuidadoso modelado y resta del cielo. El proceso general consistió en modelar las distribuciones de brillo superficial de las galaxias elípticas NGC 7619 y NGC 7626, y sus respectivos halos, incluidos varios objetos extendidos y estrellas brillantes que podrían afectar los perfiles de brillo superficial.

Se puso muy especial cuidado en restar los objetos extendidos presentes en los diferentes campos de estudio, ya que el nivel de cielo en algunas imágenes sufría de grandes variaciones en torno a las candidatas a galaxias LSB, y los halos de las dos



**Figura 2.1.** Mosaico de  $30.5 \times 30.5$  arcmin en el filtro  $r'$  obtenido de la base de datos del SDSS DR12 mostrando la región central del grupo Pegasus I. Los cuadrados representan los campos Gemini-GMOS observados (5.5 arcmin de tamaño). Los colores identifican los distintos programas que integran la muestra (azul, GN-2008B-Q-14; magenta, GN-2012A-Q-55; negro, GN-2012B-Q-69; rojo, GN-2014A-Q-70; verde, GN-2014B-Q-17; naranja, GN-2015B-Q-13). Su designación corresponde al orden en que se observó cada marco durante nuestro estudio de Pegasus I con Gemini. Las flechas grandes representan las escalas espaciales cubiertas por nuestros campos Gemini-GMOS. El norte se encuentra hacia arriba y el este hacia la izquierda.

galaxias elípticas, NGC 7619 y NGC 7626, se extendían más allá del borde de cada campo individual. Este efecto resulta particularmente influyente a la hora de obtener la fotometría de las galaxias de bajo brillo superficial. En consecuencia, se tuvo que desarrollar una técnica específica para corregir dicho efecto en algunas de las imágenes de ciencia, combinando la tarea ellipse de IRAF (Tody 1986; Jedrzejewski 1987) con el software de detección y medición automática SExtractor (Bertin & Arnouts 1996). Este software provee en forma muy rápida, las magnitudes integradas de todos los objetos extendidos presentes en los campos analizados, además de diferentes parámetros

## 2. Datos Observacionales y Fotometría

---

estructurales para cada uno de ellos. Por su parte, la tarea `ellipse` ajusta elipses a las isofotas de una galaxia partiendo de valores iniciales del semieje mayor, elipticidad, ángulo de posición y centro de la elipse. En nuestro caso, se utilizó esta tarea para ajustar isofotas a objetos que no son todas galaxias propiamente dichas, como por ejemplo estrellas brillantes o los halos de las galaxias que se extendían más allá del borde de cada campo individual. Sin embargo, este ajuste resulta válido debido a que nuestro interés, como ya se ha mencionado anteriormente, fue modelar estos objetos para luego sustraerlos de las imágenes de ciencia y así poder medir apropiadamente los perfiles de brillo superficial de las candidatas a galaxias LSB. Las diferentes estrategias seguidas en cada campo para lograr este objetivo se explican en las siguientes subsecciones.

Como se observa en la Figura 2.1, los distintos campos observados presentan una zona de solapamiento entre sí. Una consecuencia de esto es que en algunas de las regiones solapadas aparecen galaxias LSB repetidas. Para decidir que campo utilizar se analizó la calidad del nivel de cielo que se obtiene al restar el cielo y los perfiles de brillo superficial de las galaxias involucradas.

Las galaxias que se identificaron en este trabajo no son objetos catalogados por la base de datos NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*). En consecuencia, se utilizó para referirse a ellos el acrónimo PEG seguido por sus coordenadas J2000, esto es PEG Jhhmmss-ddmmss, de acuerdo a las recomendaciones de la IAU para designar nuevas fuentes (ver <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/DicForm>).

A continuación se describe el procedimiento de sustracción del cielo en cada campo GMOS analizado.

## 2.2. Sustracción del cielo e identificación de galaxias LSB

campo	R.A. (J2000)	DEC (J2000)	Fecha	filtro	$n$	$t_{\text{exp}}$ [seg]	Masa de aire	Seeing "	$Zp$
ID: GN-2008B-Q-14 PI: Favio R. Faifer									
1	23:20:46.13	8:13:05.90	04-08-2008	$g'$	8	450.00	1.03	0.94	27.75
			04-08-2008	$r'$	4	450.00	1.12	0.79	28.18
			04-08-2008	$i'$	4	450.00	1.21	0.76	28.11
2	23:21:03.85	8:13:31.61	26-08-2008	$g'$	8	450.00	1.09	0.76	27.75
			26-08-2008	$r'$	4	450.00	1.27	0.70	28.18
			26-08-2008	$i'$	4	450.00	1.16	0.65	28.11
3	23:20:27.82	8:12:41.29	10-08-2008	$g'$	8	450.00	1.02	0.83	27.75
			10-08-2008	$r'$	4	450.00	1.05	0.83	28.18
			10-08-2008	$i'$	4	450.00	1.10	0.87	28.11
4	23:20:15.62	8:14:00.79	08-08-2008	$g'$	8	450.00	1.02	0.95	27.75
			08-08-2008	$r'$	4	450.00	1.10	1.02	28.18
			08-08-2008	$i'$	4	450.00	1.33	0.74	28.11
ID: GN-2012A-Q-55 PI: Analía Smith Castelli									
5	23:19:56.08	8:14:14.91	23-06-2012	$g'$	8	440.00	1.28	0.77	28.21
			21-06-2012	$r'$	4	440.00	1.25	0.65	28.31
			24-06-2012	$i'$	6	300.00	1.28	0.80	28.49
ID: GN-2014A-Q-70 PI: Favio R. Faifer									
6	23:20:12.68	8:08:58.91	23-06-2014	$g'$	8	450.00	1.29	0.69	28.28
			25-06-2014	$r'$	4	450.00	1.28	0.70	28.40
			25-06-2014	$i'$	6	300.00	1.18	0.58	28.44
ID: GN-2014B-Q-17 PI: Nélica M. González									
7	23:20:34.10	8:08:06.05	27-07-2014	$g'$	8	450.00	1.25	0.96	28.21
			27-07-2014	$r'$	4	450.00	1.08	0.89	28.40
			27-07-2014	$i'$	6	300.00	1.04	0.89	28.48
ID: GN-2015B-Q-13 PI: Nélica M. González									
8	23:20:58.08	8:09:03.85	25-07-2015	$g'$	10	450.00	1.02	0.63	28.21
			25-07-2015	$r'$	8	300.00	1.05	0.55	28.40
			25-07-2015	$i'$	8	300.00	1.12	0.49	28.48
ID: GN-2012B-Q-69 PI: Favio R. Faifer									
Comparación	23:20:44.91	8:01:51.16	24-08-2012	$g'$	8	450.00	1.03	0.66	28.20
			24-08-2012	$r'$	4	450.00	1.02	0.57	28.32
			24-08-2012	$i'$	4	450.00	1.04	0.64	28.45

**Tabla 2.1.** Información relativa a las imágenes de los diferentes campos de Pegasus I utilizadas para el desarrollo de esta tesis. La columna  $n$  indica la cantidad de imágenes que se promediaron para obtener la imagen final de cada campo. La columna  $Zp$  es la constante de punto de cero para pasar al sistema estándar. Este dato fue obtenido de Faifer et al., (paper en preparación).

### 2.2.1. Campo 1

Este campo incluye una de las galaxias elípticas dominantes de Pegasus I: NGC 7626. Por lo tanto, para sustraer un valor de cielo, se utilizaron las tareas `imexamine`, `imcalc`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF. En primer lugar, para cada imagen, se estimó el valor medio de los niveles de cielo y con la tarea `imcalc` se sustrajo de las mismas. Este valor se calcula utilizando la tarea `imexamine`, considerando diferentes zonas que no posean ninguna fuente apreciable. Posteriormente, empleando la tarea `ellipse` y `bmodel` se procedió a modelar la distribución de brillo superficial de la galaxia elíptica NGC 7626 y su respectivo halo, incluyendo varios objetos extendidos y estrellas brillantes que afectan

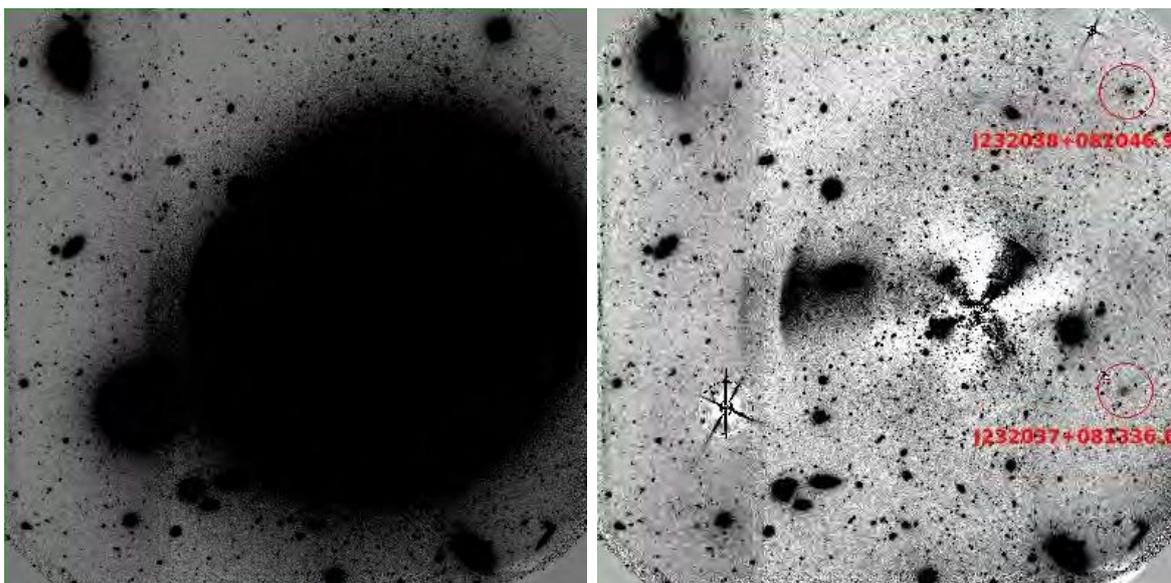
## 2. Datos Observacionales y Fotometría

al nivel del cielo en torno a las dos candidatas a galaxias LSB detectadas en este campo. Para correr la tarea `ellipse`, se enmascararon, en cada una de las imágenes, las zonas saturadas, objetos brillantes (puntuales y/o extendidos) y regiones malas propias de cada imagen alrededor de la zona del ajuste. Finalmente, se restaron dichos modelos usando la tarea `imarith` con el fin de poder medir los perfiles de brillo superficial de las candidatas a galaxias LSB. Cabe mencionar que se realiza una última corrección residual del cielo a los perfiles calculados de las galaxias LSB, como se explicará más adelante.

En la Figura 2.2 se muestra la imagen en el filtro  $r'$ , antes y después de la resta de la galaxia brillante NGC 7626, los objetos extendidos y las estrellas en torno a las dos candidatas a galaxias LSB detectadas en este campo.

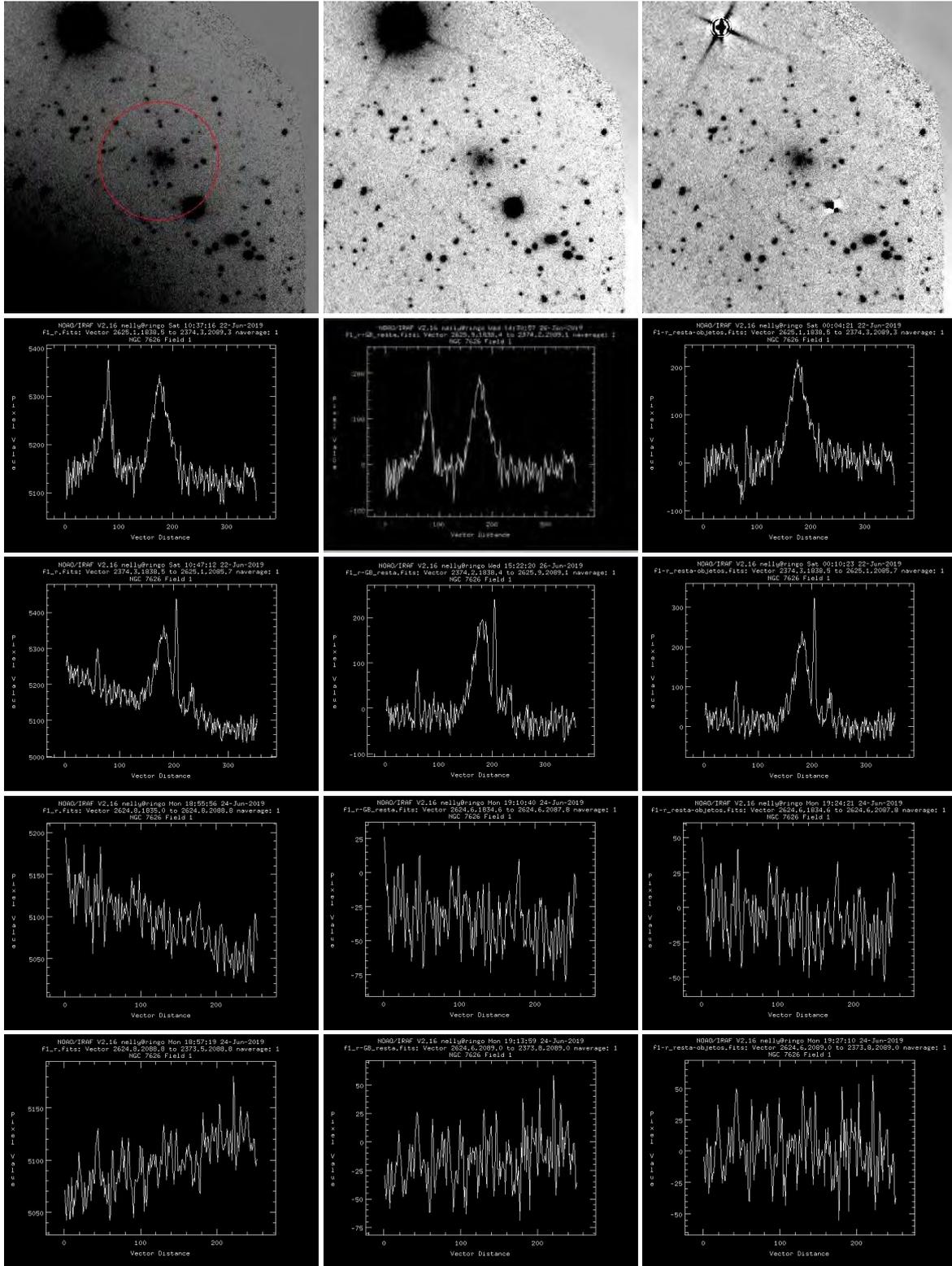
A modo de ejemplo, en la Figura 2.3 se muestran diferentes etapas de la sustracción del nivel de cielo alrededor de la candidata PEG J232038+081046.9 y la distribución de brillo en torno a la galaxia LSB con diferentes cortes. Se destaca cómo se ha eliminado el gradiente del nivel de cielo.

Como se mencionó anteriormente, en este campo se encontraron dos candidatas a galaxias LSB, pero la candidata PEG J232037+081336.6 se encuentra también en el campo 3 y la candidata PEG J232038+081046.9 se localiza en los campos 3 y 7. A través de la comparación fotométrica hecha de estos objetos en los diferentes campos se decidió tomar los datos fotométricos del campo 3 de estas candidatas.



**Figura 2.2.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 1 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta de la galaxia brillante NGC 7626, los objetos extendidos y las estrellas en torno a las dos candidatas a galaxias LSB. Los círculos rojos indican la ubicación de dichas galaxias LSB encontradas en este campo.

## 2.2. Sustracción del cielo e identificación de galaxias LSB

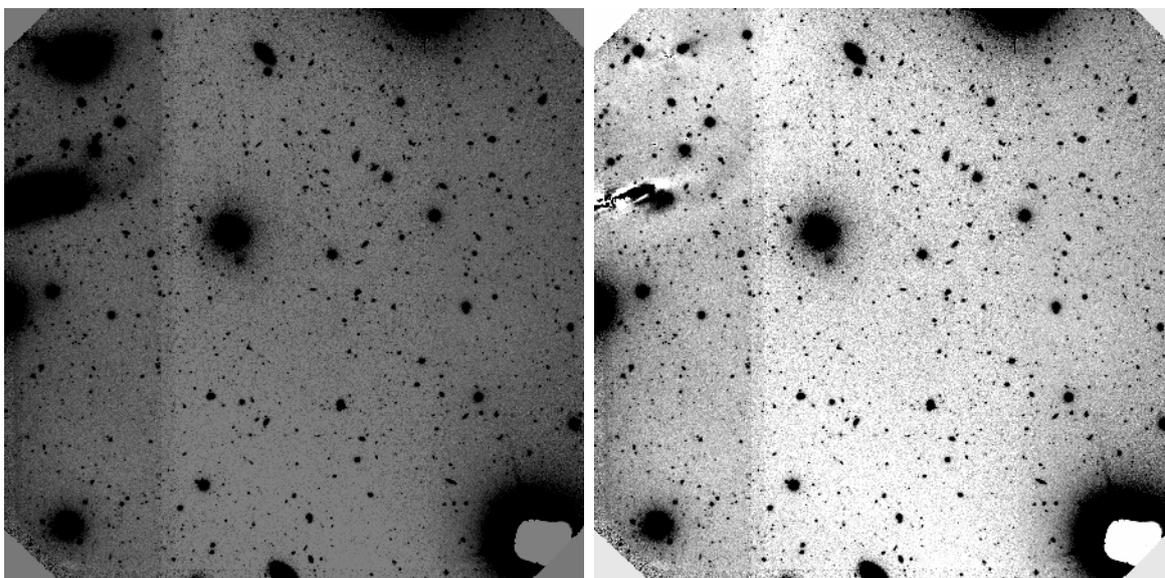


**Figura 2.3.** Ejemplo de sustracción del nivel de cielo en torno a la candidata PEG J232038+081046.9. En el panel superior se muestra de izquierda a derecha, la imagen original en el filtro  $r'$ , la imagen con la sustracción de la galaxia NGC 7626, imagen final con la sustracción de los objetos en torno a la candidata que es utilizada en la fotometría. En los paneles inferiores se muestra la distribución de brillo en torno a la galaxia LSB con diferentes cortes. En la última columna se aprecian las menores variaciones en torno a la candidata a galaxia LSB. El tamaño de la imagen es de  $83 \times 83$  arcsec.

### 2.2.2. Campo 2

Este campo no incluye a ninguna de las galaxias dominantes de Pegasus I. Para sustraer un valor del cielo, se utilizaron las tareas `imexamine`, `imcalc`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF. En primer lugar, como en el caso anterior, para cada imagen, utilizando la tarea `imexamine` se estimó el valor medio de los niveles de cielo y con la tarea `imcalc` se substrajo de las mismas. Posteriormente, empleando la tarea `ellipse`, `bmodel` e `imarith` se procedió a modelar y restar la distribución de brillo de algunos objetos extendidos y estrellas brillantes que afectan al nivel del cielo.

En la Figura 2.4 se muestra la imagen en el filtro  $r'$ , antes y después de la resta de algunos objetos extendidos y estrellas brillantes. En este campo no se encontraron candidatas a galaxias LSB.



**Figura 2.4.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 2 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta de algunos de los objetos extendidos. En este campo no se encontraron candidatas a galaxias LSB.

### 2.2.3. Campo 3

En este campo se encontró la dificultad de tener solo una fracción de cada uno de los halos de las galaxias elípticas dominantes de Pegasus I: NGC 7619 y NGC 7626, varios objetos extendidos y estrellas brillantes en torno a las tres candidatas a galaxias LSB encontradas en este campo. Se procedió entonces a modelar los halos de NGC 7619 y NGC 7626, y los objetos que pudieran afectar a los perfiles de brillo superficial de las candidatas a galaxias LSB, utilizando las tareas `imexamine`, `imcalc`, `geotran`, `imcopy`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF.

El procedimiento seguido, en parte, fue similar al realizado en el campo 1. En primer lugar, se empleó la tarea `imexamine` para estimar el nivel de cielo de las imágenes y con la tarea `imcalc` sustraerlo de las mismas. Luego, antes de correr la tarea `ellipse` sobre la fracción de los halos de NGC 7619 y NGC 7626, se debió redimensionar las imágenes originales del campo 3 en los tres filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ . Pues para aplicar la tarea `ellipse` en los halos de dichas galaxias, es necesario modificar las imágenes, de tal forma

que se pueda considerar el centro de estas galaxias dentro de la imagen. Para ello, se utilizó la tarea `geotran`, para generar una imagen de tamaño  $3108 \times 3696$  píxeles con valores 0 (cabe señalar que el tamaño de la imagen Gemini-GMOS es de  $3108 \times 2304$  píxeles). En la Figura 2.5 se pueden ver los parámetros utilizados al aplicar esta tarea. Luego, aplicando la tarea `imcopy` se procedió a pegar la imagen con el nivel de cielo sustraído, generando así una nueva imagen que incluye nuevas regiones que permitió ejecutar `ellipse` sobre los halos de las galaxias NGC 7619 y NGC 7626 sin problemas de convergencia. Antes de correr la tarea `ellipse` es necesario enmascarar, en cada una de las imágenes, las nuevas regiones, zonas saturadas, objetos brillantes (puntuales y/o extendidos) y regiones malas propias de cada imagen en torno a la zona del ajuste.

Una vez redimensionadas las imágenes, el proceso realizado para sustraer los halos de NGC 7619 y NGC 7626, en cada filtro, fue primero modelar el halo de la galaxia elíptica NGC 7626, que se restó de las imágenes redimensionadas. Ahora, en estas imágenes restadas, se modeló el halo de NGC 7619. Este modelo fue sustraído de las imágenes redimensionadas y se iteró el proceso realizado modelando los halos de NGC 7619 y NGC 7626, con el fin de modelar dichos halos sin que sean afectados mutuamente. Una vez finalizado el proceso de iteración, modelado y sustracción de los halos en las imágenes redimensionadas, se procedió a modelar los objetos extendidos y estrellas brillantes que afectan al nivel del cielo en torno a las galaxias LSB de las imágenes que no tienen incluidos los halos de NGC 7619 y NGC 7626. Por último, se sumaron todos los modelos y fueron sustraídos de las imágenes redimensionadas. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de la transformación del campo 3 para aplicar la tarea `ellipse` sobre el halo de la galaxia NGC 7626.

En la Figura 2.7 se muestra la imagen en el filtro  $r'$ , antes y después de la resta de los halos de las galaxias brillantes NGC 7619 y NGC 7626, los objetos extendidos y las estrellas alrededor de las tres candidatas a galaxias LSB detectadas en este campo.

Como se mencionó anteriormente, en este campo se encontraron tres candidatas a galaxias LSB, pero en el caso de la candidata PEG J232023+081331 el proceso realizado para sustraer la contribución del cielo no fue óptimo para medir los perfiles de brillo superficial. Esto se debió a que el nivel de cielo resultante sufría grandes variaciones sistemáticas en torno a esta candidata. Por consiguiente, se desarrolló una técnica específica para corregir dichas variaciones alrededor de esta galaxia de bajo brillo superficial, que consistió en aplicar SExtractor en las imágenes que tienen sustraídos los halos de NGC 7619 y NGC 7626, los objetos extendidos y estrellas brillantes. A la imagen resultante, de aquí en adelante, la llamaremos “imagen maestra” (ver Figura 2.8(a)). Esta corrección, es muy importante debido a que los objetos de nuestro estudio son muy débiles. Por esta razón, se busca que las imágenes resultantes tengan un nivel de cielo plano, homogéneo y con un valor  $\sim 0$  ADUs (Unidades Analógicas Digitales).

SExtractor para separar los objetos del cielo usa un proceso de segmentación que consiste en separar regiones de la imagen con distintas propiedades (brillos, colores, formas, etc.). Precisamente, considera como objeto a un grupo de píxeles seleccionados a través de una serie de procesos que excedan un cierto umbral de detección sobre el cielo. Para ello, inicialmente se tiene que crear un mapa de cielo local en cada región de la imagen, los parámetros `BACK_SIZE` (tamaño en píxeles donde se calcula el cielo) y `BACK_FILTERSIZE` (tamaño del filtro de mediana para calcular el cielo),

## 2. Datos Observacionales y Fotometría

---

son los que influyen en la creación del mapa de cielo. Si el valor de `BACK_SIZE` es demasiado grande, no reproduce las variaciones locales del cielo, mientras que si es demasiado pequeño, aquél podría estar afectado por la presencia de objetos o por el ruido. Normalmente, se suelen tomar como óptimos valores comprendidos en el intervalo de 32 a 256 píxeles. La elección de `BACK_FILTERSIZE` también afecta la creación del mapa de cielo. Se suele tomar un valor de  $3 \times 3$  que da buenos resultados combinado con los valores del `BACK_SIZE` mencionados anteriormente. En este trabajo para la creación del mapa de cielo se utilizó un valor de `BACK_SIZE = 124` y `BACK_FILTERSIZE = 3`.

Como se mencionó anteriormente, para sustraer las variaciones del nivel de cielo es necesario construir un adecuado mapa del cielo. La imagen final del cielo será posteriormente sustraída a la “imagen maestra”. Para esto, a continuación se detallan los pasos llevados a cabo por SExtractor:

Se ejecutó SExtractor (opción `CHECKIMAGE_TYPE = -OBJECTS`) en la “imagen maestra” para detectar todos los objetos y producir una nueva imagen en la que se eliminaron todos estos objetos (ver Figura 2.8(b)). En el siguiente paso, se aplicó SExtractor para la creación del mapa de cielo a la “imagen maestra” (opción `CHECKIMAGE_TYPE = BACKGROUND`), con el fin de poder sumar ambas imágenes para obtener una nueva imagen libre de objetos (ver Figuras 2.8(c) y 2.8(d)) y a partir de esa imagen modelar un nuevo mapa de cielo (ver Figura 2.8(e)) que no está afectado por los objetos propios de la imagen. Luego, la imagen final del cielo es sustraída de la “imagen maestra”. En consecuencia, se obtiene una imagen final (ver Figuras 2.8(f) y 2.9) con menores variaciones en torno a la candidata a galaxia LSB.

Finalmente, cabe mencionar que para los casos de las otras dos candidatas PEG J232037+081336.6 y PEG J232038+081046.9, estas se repiten en el campo 1 la primera y en los campos 1 y 7 la segunda. Pero a través de la comparación fotométrica hecha de estos objetos en los diferentes campos se decidió tomar los datos fotométricos correspondientes a este campo.

## 2.2. Sustracción del cielo e identificación de galaxias LSB

```

                                I R A F
                    Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = immatch
    TASK = geotran

input      = "mrgS20120921S0060.fits[1]"      Input images
output     = "mrgS20120921S0060-geotran.fits" Output data
database   = ""                               Name of GEOMAP database file
transforms=                               Names of coordinate transforms in database file
(geometry = "geometric")                    Transformation type (linear,geometric)
(xin      = INDEF)                           X origin of input frame in pixels
(yin      = INDEF)                           Y origin of input frame in pixels
(xshift   = 0.)                              X origin shift in pixels
(yshift   = 0.)                              Y origin shift in pixels
(xout     = INDEF)                           X origin of output frame in reference units
(yout     = INDEF)                           Y origin of output frame in reference units
(xmag     = INDEF)                           X scale of input picture in pixels per referenc
(ymag     = INDEF)                           Y scale of input picture in pixels per referenc
(xrotation= INDEF)                           X axis rotation in degrees
(yrotation= INDEF)                           Y axis rotation in degrees
(xmin     = 1.)                              Minimum reference x value of output picture
(xmax     = 3108.)                           Maximum reference x value of output picture
(ymin     = 1.)                              Minimum reference y value of output picture
(ymax     = 3696.)                           Maximum reference y value of output picture
(xscale   = 1.)                              X scale of output picture in reference units pe
(yscale   = 1.)                              Y scale of output picture in reference units pe
(ncols    = INDEF)                           Number of columns in the output picture
(nlines   = INDEF)                           Number of lines in the output picture
(xsample  = 1.)                              Coordinate surface sampling interval in x
(ysample  = 1.)                              Coordinate surface sampling interval in y
(interpolant = "linear")                      Interpolant
(boundary = "constant")                      Boundary extension (nearest,constant,reflect,wr
(constant = 0.)                              Constant boundary extension
(fluxconserve = yes)                         Preserve image flux?
(nxblock  = 512)                             X dimension of working block size in pixels
(nyblock  = 512)                             Y dimension of working block size in pixels
(verbose  = yes)                             Print messages about the progress of the task
(mode    = "ql")

```

Figura 2.5. Archivo de parámetros de la tarea geotran de IRAF.

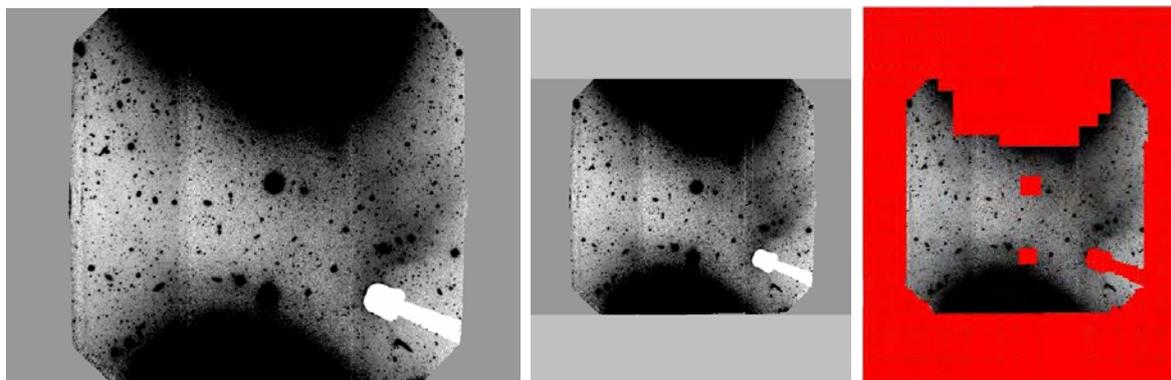
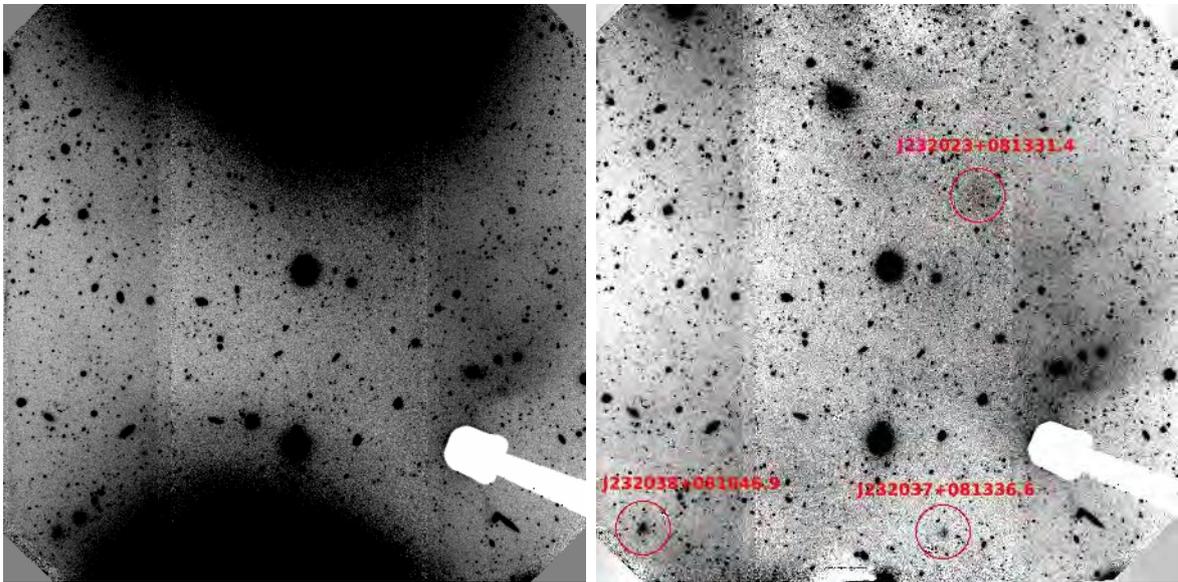
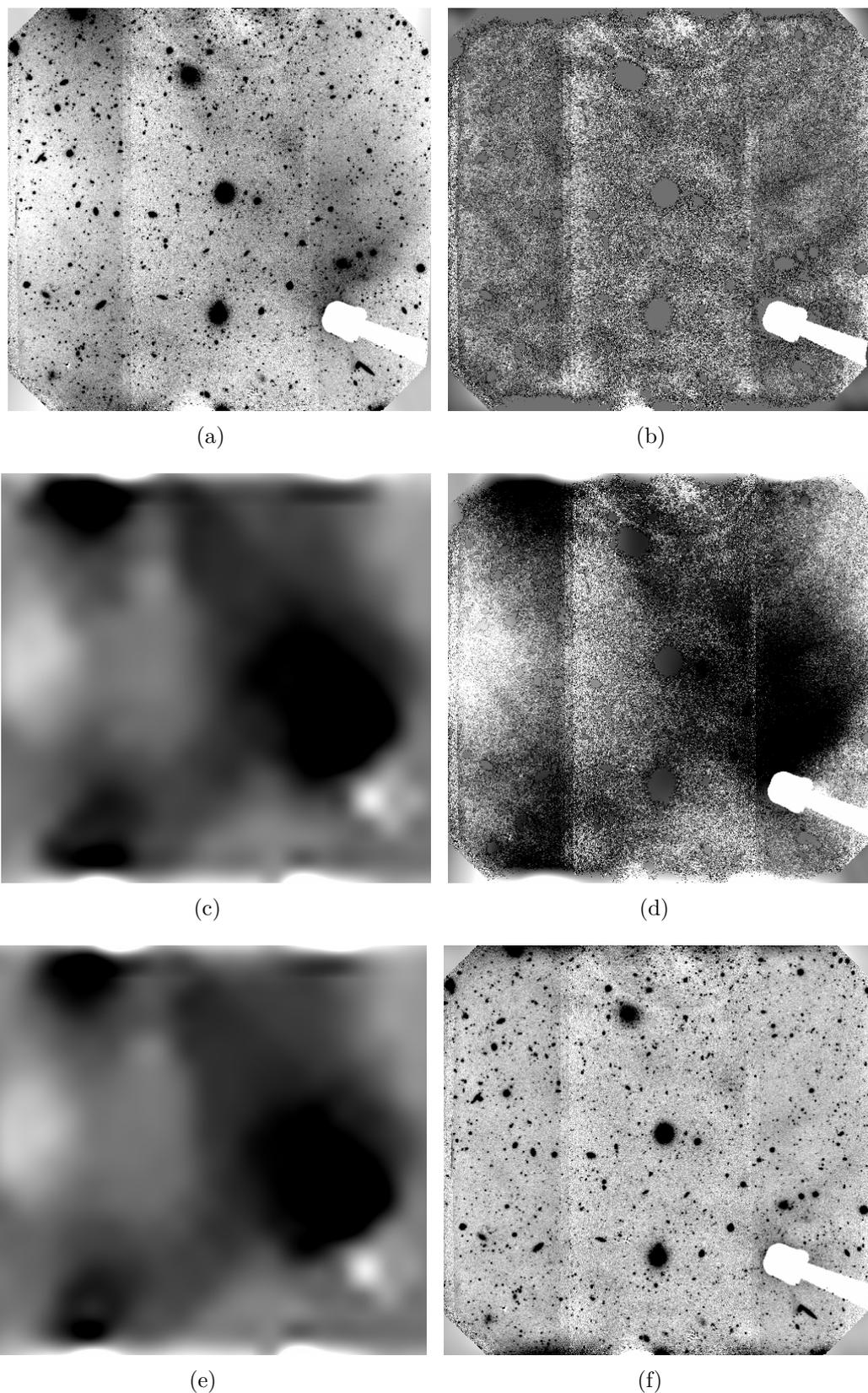


Figura 2.6. Ejemplo de transformación del campo 3 para aplicar la tarea ellipse. Se muestra de izquierda a derecha, la imagen original en el filtro  $r'$  de tamaño  $3108 \times 2304$ , imagen redimensionada de tamaño  $3108 \times 3696$  píxeles e imagen redimensionada con las zonas enmascaradas que permiten ejecutar la tarea ellipse sobre el halo de NGC 7626.

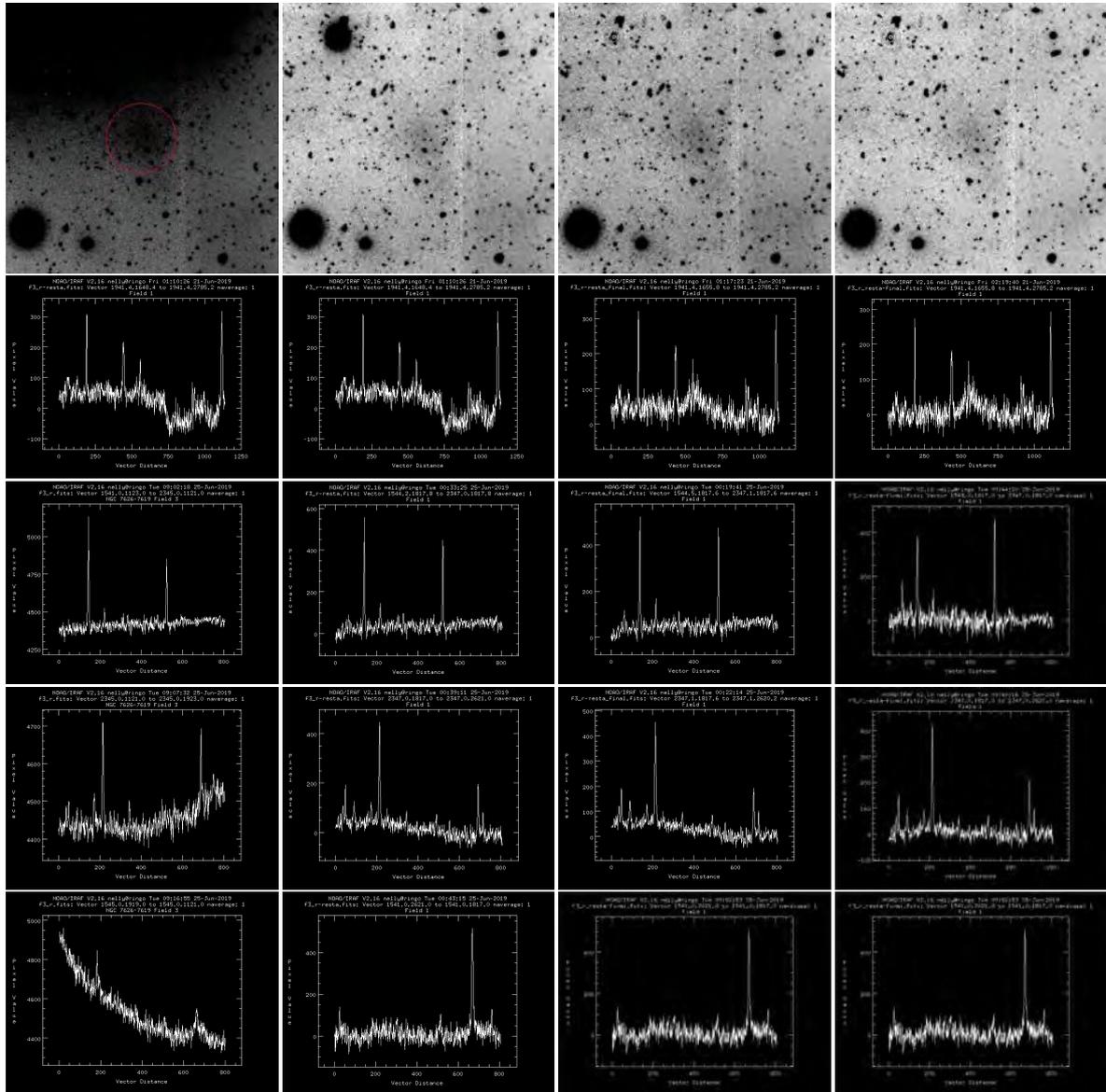


**Figura 2.7.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 3 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta de los halos de las galaxias brillantes NGC 7619 y NGC 7626, los objetos extendidos y las estrellas en torno a las candidatas a galaxias LSB. Los círculos rojos indican la ubicación de dichas galaxias LSB encontradas en este campo.



**Figura 2.8.** De izquierda a derecha, y de arriba hacia abajo, se muestran los siguientes gráficos: (a) “imagen maestra” en el filtro  $r'$  sobre la que trabajamos para obtener la fotometría de la candidata a galaxia LSB antes de aplicar SExtractor; (b) imagen de salida de SExtractor, la cual no contiene los objetos detectados; (c) imagen del mapa del cielo utilizando el valor de `BACK_SIZE = 124`; (d) imagen resultante de sumar la imagen sin los objetos y la imagen del mapa del cielo; (e) imagen final del mapa del cielo utilizando el valor de `BACK_SIZE = 124`; (f) imagen final, con menores variaciones en torno a la candidata a galaxia LSB.

## 2. Datos Observacionales y Fotometría



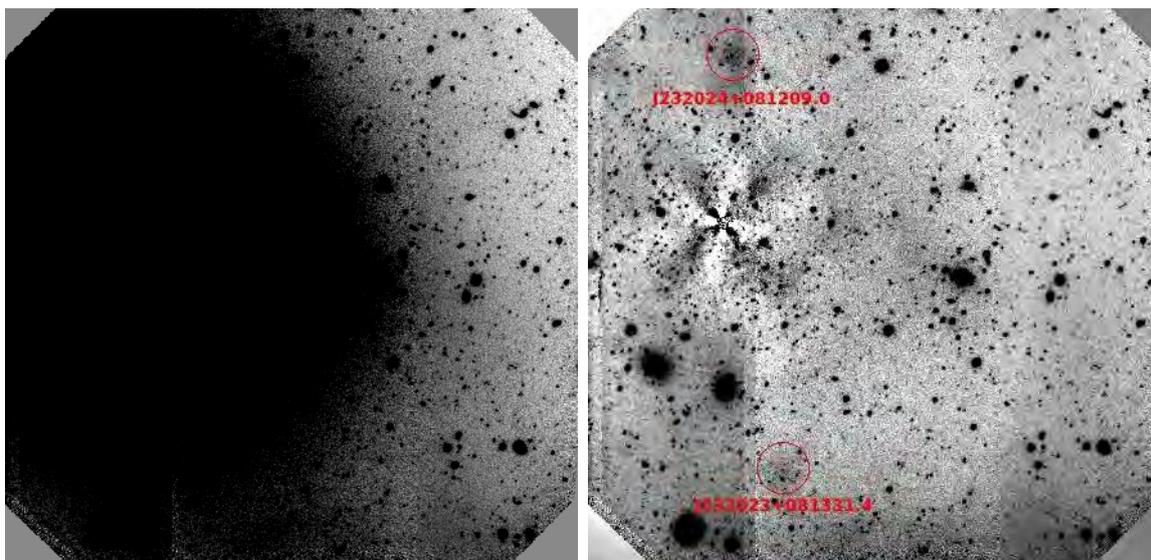
**Figura 2.9.** Ejemplo de sustracción del nivel de cielo en torno a la candidata PEG J232023+081331.4. En el panel superior se muestra de izquierda a derecha, la imagen original en el filtro  $r'$ , la imagen con la sustracción de los halos de NGC 7619 y NGC 7626, imagen con la sustracción de los objetos e imagen final con el nivel de cielo corregido con SExtractor que es utilizada en la fotometría para esta candidata. En los paneles inferiores se muestran la distribución de brillo en torno a la galaxia LSB con diferentes cortes. En la última columna se aprecian las menores variaciones en torno a la candidata a galaxia LSB. El tamaño de la imagen es de  $120 \times 120$  arcsec.

### 2.2.4. Campo 4

Este campo incluye la galaxia elíptica dominante de Pegasus I: NGC 7619. Por lo tanto, para sustraer un valor del cielo, se utilizaron las tareas `imexamine`, `imcalc`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF. El procedimiento seguido fue similar al realizado en el campo 1. En primer lugar, se empleó la tarea `imexamine` para estimar el nivel de cielo de las imágenes y con la tarea `imcalc` sustraerlo de las mismas. Luego, empleando la tarea `ellipse` y `bmodel` se procedió a modelar la distribución de brillo superficial de la galaxia elíptica NGC 7619, incluyendo varios objetos extendidos y estrellas brillantes que afectan al nivel del cielo en torno a las dos candidatas a galaxias LSB detectadas en este campo. Después del proceso de modelado y sustracción, se obtuvo niveles de cielo satisfactorios (el valor residual promedio es inferior al 0.5 % del valor original) en las regiones de las galaxias LSB.

En la Figura 2.10 se muestra la imagen en el filtro  $r'$ , antes y después de la resta de la galaxia NGC 7619, los objetos extendidos y las estrellas alrededor de las dos candidatas a galaxias LSB detectadas en este campo.

En este campo, como se mencionó anteriormente, se encontraron dos candidatas a galaxias LSB, pero la candidata PEG J232023+081331 se encuentra también en el campo 3, a través de la comparación fotométrica hecha de este objeto en ambos campos se decidió tomar los datos fotométricos del campo 3 de esta candidata.



**Figura 2.10.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 4 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta de la galaxia brillante NGC 7619, los objetos extendidos y las estrellas en torno a las dos candidatas a galaxias LSB. Los círculos rojos indican la ubicación de dichas galaxias LSB encontradas en este campo.

### 2.2.5. Campo 5

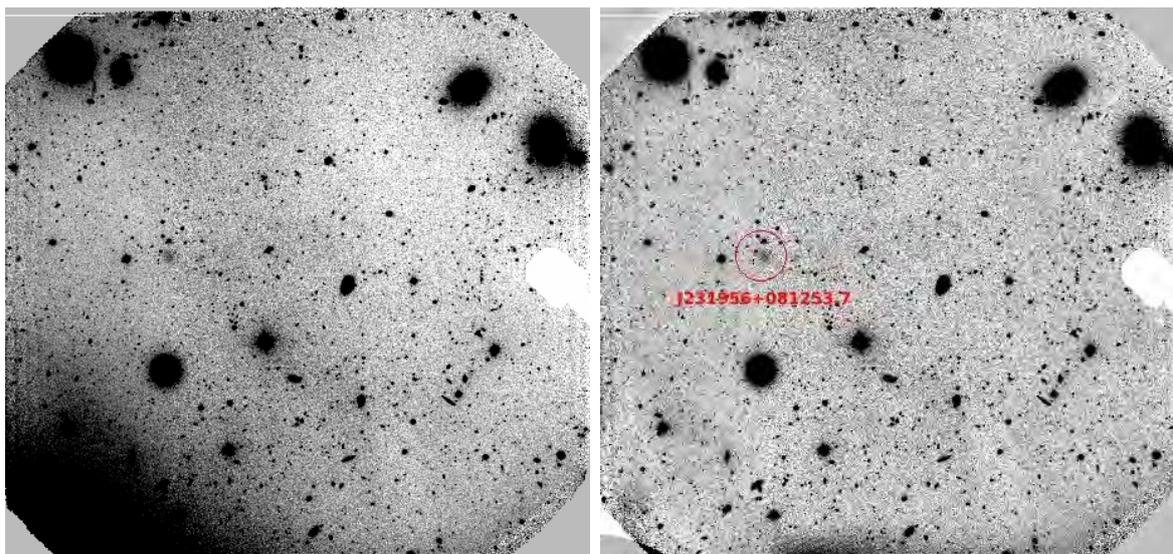
En este campo se encontró la dificultad de tener parte del halo de la galaxia elíptica NGC 7619, presentando así cierta similitud al campo 3. Por lo tanto, para sustraer un valor del cielo, se utilizaron las tareas `imexamine`, `imcalc`, `geotran`, `imcopy`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF.

## 2. Datos Observacionales y Fotometría

El procedimiento seguido fue similar al realizado en el campo 3. En primer lugar, se estimó con la tarea `imexamine` el nivel cielo de las imágenes en los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  y con la tarea `imcalc` se sustrajo de las mismas. Luego, antes de correr la tarea `ellipse` sobre el halo de NGC 7619, se debió redimensionar las imágenes originales del campo 5 en los tres filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ . Pues para aplicar la tarea `ellipse` en el halo de NGC 7619, es necesario modificar las imágenes agregando una nueva región en la parte inferior de las mismas (que se corresponde a la ubicación de dicho halo), que luego debe ser enmascarada y permite ejecutar `ellipse` sin problemas de convergencia. Para ello, de manera similar a como se procedió con el campo 3 se utilizó la tarea `geotran`.

Posteriormente se procedió a modelar la distribución de brillo superficial del halo de la galaxia elíptica NGC 7619. En la Figura 2.11 se muestra la imagen original en el filtro  $r'$  de este campo y la resta del halo de NGC 7619.

En este campo se encontró solo una candidata a galaxia LSB (PEG J231956+081253), pero el proceso realizado para sustraer la contribución del cielo no fue óptimo para medir los perfiles de brillo superficial, ya que el nivel de cielo sufría grandes variaciones en torno a esta candidata. Por consiguiente, para este caso se utilizó la técnica que incluye a `SExtractor` para sustraer dichas variaciones, siguiendo los mismos pasos explicados para el campo 3.



**Figura 2.11.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 5 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta del halo de NGC 7619. El círculo rojo indica la ubicación de la galaxia LSB encontrada en este campo.

### 2.2.6. Campo 6

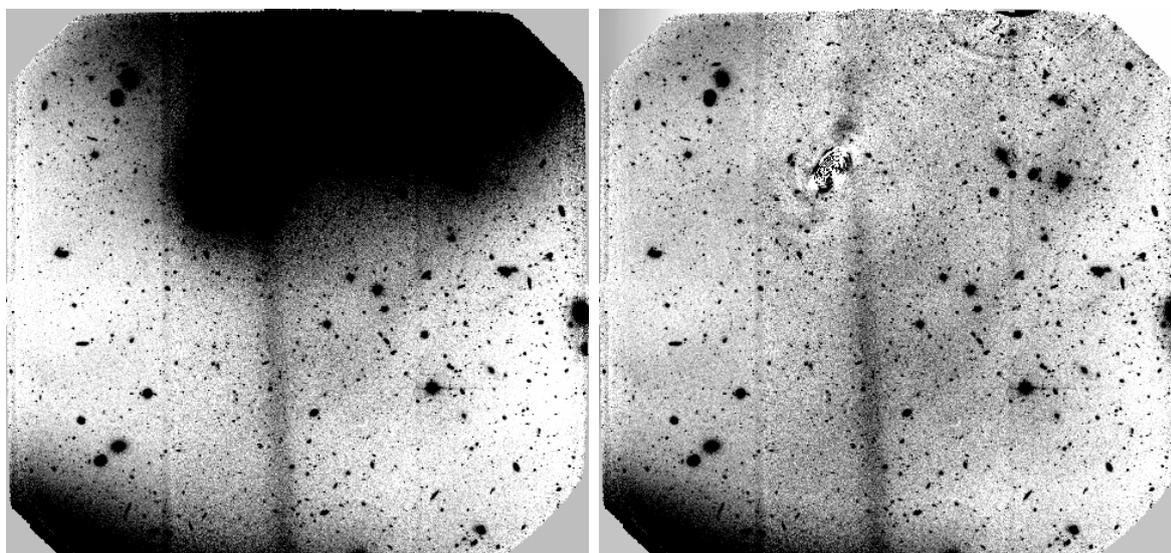
Este campo tiene cierta similitud con el campo 5, es decir, tiene la dificultad de tener parte del halo de la galaxia elíptica NGC 7619 y además a la galaxia lenticular (S0) NGC 7617. Por lo tanto, para sustraer un valor del cielo, se utilizaron las tareas `imexamine`, `imcalc`, `geotran`, `imcopy`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF.

El procedimiento seguido fue similar al realizado en los campos 3 y 5. En primer lugar, se estimó con la tarea `imexamine` el nivel cielo de las imágenes en los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  y con la tarea `imcalc` se sustrajo de las mismas. Luego, antes de correr la tarea

elipse sobre el halo de NGC 7619, se debió redimensionar las imágenes originales del campo 6 en los tres filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ . Tal como se procedió anteriormente, para aplicar la tarea `ellipse` en el halo de NGC 7619, se modificaron las imágenes agregando una nueva región en la parte superior de las mismas, que luego debió ser enmascarada y permitió ejecutar la tarea `ellipse` sin problemas de convergencia. Para ello, de manera similar a como se procedió con los campos 3 y 5 se utilizó la tarea `geotran`.

Una vez redimensionadas las imágenes, el proceso realizado para sustraer el halo de NGC 7619 y NGC 7617, en cada filtro, fue primero modelar el halo de la galaxia elíptica NGC 7619, restándolo luego de las imágenes redimensionadas. Ahora, en estas imágenes restadas, se modeló la galaxia NGC 7617. Este modelo fue sustraído de las imágenes redimensionadas y se iteró el proceso realizado modelando los halos de NGC 7619 y NGC 7617, con el fin de modelar dichas galaxias sin que sean afectadas mutuamente.

En la Figura 2.12 se muestra la imagen original en el filtro  $r'$  de este campo y la resta del halo de NGC 7619 y la galaxia lenticular NGC 7617. En este campo no se encontraron candidatas a galaxias LSB.



**Figura 2.12.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 6 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta del halo de NGC 7619 y la galaxia lenticular NGC 7617. En este campo no se encontraron candidatas a galaxias LSB.

### 2.2.7. Campo 7

En este campo se encontró la dificultad de tener el halo de la galaxia elíptica NGC 7626, varios objetos extendidos y estrellas brillantes en torno a las candidatas a galaxias LSB. Por lo tanto, se procedió de manera similar como se hizo con los otros campos a modelar el halo de NGC 7626, y los objetos que pudieran afectar a los perfiles de brillo superficial de las dos candidatas a galaxias LSB detectadas en este campo, utilizando las tareas `imexamine`, `imcalc`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF.

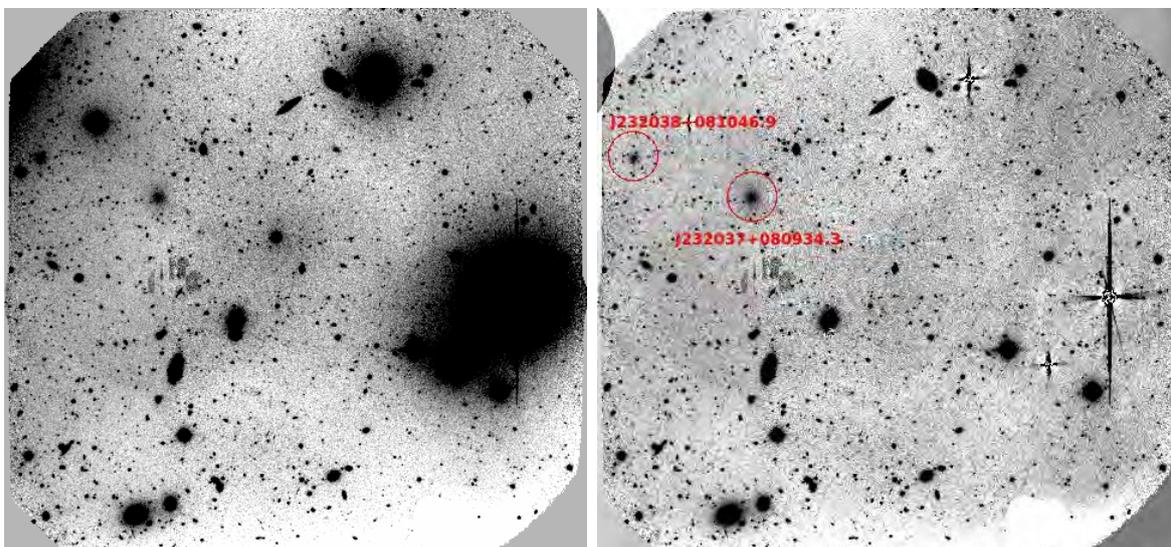
En primer lugar, utilizando la tarea `imexamine` se estimó el nivel de cielo de las imágenes en los tres filtros y con la tarea `imcalc` se lo sustrajo de dichas imágenes. Posteriormente, empleando la tarea `ellipse`, `bmodel` e `imarith` se procedió a modelar y

## 2. Datos Observacionales y Fotometría

restar la distribución de brillo superficial del halo de la galaxia elíptica NGC 7626, varios objetos extendidos y estrellas brillantes que afectan al nivel de cielo en torno a las candidatas a galaxias LSB. Después del proceso de modelado y sustracción, se obtuvieron niveles de cielo satisfactorios (el valor residual promedio es inferior al 0,25 % del valor original) en las regiones de las galaxias LSB.

En la Figura 2.13 se muestra la imagen original en el filtro  $r'$  de este campo y la imagen resultante de la resta del halo de NGC 7626, varios objetos extendidos y estrellas brillantes.

En este campo, como se mencionó anteriormente, se encontraron dos candidatas a galaxias LSB, pero la candidata PEG J232038+081046.9 se encuentra también en los campos 1 y 3, a través de la comparación fotométrica hecha de este objeto en los diferentes campos se decidió tomar los datos fotométricos del campo 3 de esta candidata.



**Figura 2.13.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 7 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta del halo de NGC 7626, varios objetos extendidos y estrellas brillantes. Los círculos rojos indican la ubicación de las galaxias LSB encontradas en este campo.

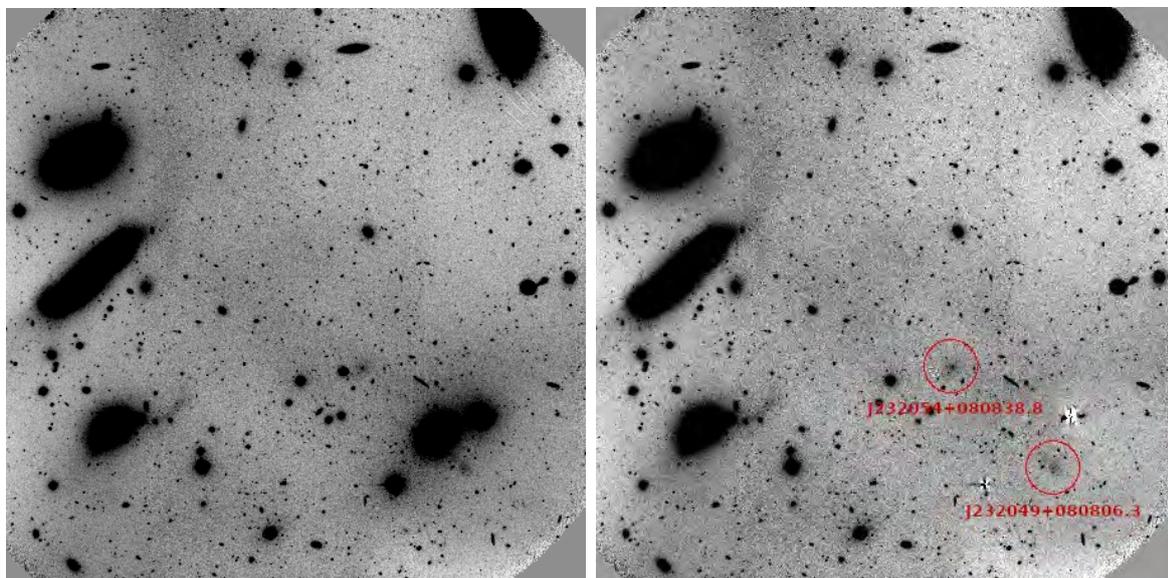
### 2.2.8. Campo 8

En este campo se trabajó de manera similar a los campos anteriores, excepto que estas imágenes no fueron afectadas por los halos de las elípticas brillantes. Por lo tanto, para sustraer un valor del cielo, se utilizaron las tareas `imexamine`, `imcalc`, `ellipse`, `bmodel` e `imarith` de IRAF.

En primer lugar, se estimó con la tarea `imexamine` el nivel de cielo de las imágenes en los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  y con la tarea `imcalc` se sustrajo de las mismas. Luego, empleando la tarea `ellipse`, `bmodel` e `imarith` se procedió a modelar y restar la distribución de brillo superficial de varios objetos extendidos y estrellas brillantes que afectan al nivel del cielo en torno a las dos candidatas a galaxias LSB detectadas en este campo.

En la Figura 2.14 se muestra la imagen original en el filtro  $r'$  de este campo y la resta de varios objetos extendidos y estrellas brillantes.

En este campo, como se mencionó anteriormente, se encontraron dos candidatas a galaxias LSB, la candidata PEG J232049+080806.2 y la PEG J232054+080838.8, ésta última presenta lo que parece ser un núcleo.



**Figura 2.14.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo 8 del grupo de Pegasus I, antes y después de la resta de los objetos extendidos. Los círculos rojos indican la ubicación de las galaxias LSB encontradas en este campo.

### 2.2.9. Campo Comparación

En este campo se trabajó de manera un poco diferente a los campos anteriores, debido a que estas imágenes no fueron afectadas por las galaxias elípticas, ni objetos extendidos o estrellas brillantes. Por lo tanto, para sustraer un valor del cielo, se utilizaron las tareas `imexamine`, `imcalc` e `imsurfit` de IRAF.

En primer lugar, de la misma forma que en los campos anteriores se estimó con la tarea `imexamine` el nivel del cielo de las imágenes en los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  y con la tarea `imcalc` se sustrajo de las mismas. Una vez realizado este paso, se encontró que el nivel de cielo resultante tiene un leve gradiente en torno a cada candidata a galaxia LSB. Como se mencionó previamente, el nivel de cielo debe ser plano y homogéneo, debido a que los objetos de estudio son muy débiles. Entonces para corregir dicho gradiente se utilizó la tarea `imsurfit` de IRAF. Con ese fin, se optó entonces por identificar cada galaxia LSB y determinar sus coordenadas sobre el sistema de referencia de cada imagen. Se procedió a recortar, para cada galaxia, una sección centrada en la misma de  $210 \times 210$  píxeles ( $31 \times 31$  arcsec). Una vez recortada la galaxia de la imagen Gemini-GMOS, se restó el gradiente del nivel de cielo. Dicho gradiente se modeló ajustando un polinomio de Legendre de bajo orden mediante la tarea `imsurfit` de IRAF.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.15 se muestra en los paneles izquierdos la imagen en el filtro  $r'$  y la distribución de brillo en torno a la galaxia LSB con diferentes cortes, en la cual se aprecia el leve gradiente en el nivel de cielo. En los paneles derechos se muestra la imagen con la sustracción de la variación del nivel de cielo mediante la tarea

insurfit y la distribución de brillo en torno a la galaxia LSB con diferentes cortes. Se destaca cómo se ha eliminado el gradiente del nivel de cielo.

En la Figura 2.16 se muestra la imagen del campo de comparación en el filtro  $r'$ , en la cual con círculos rojos se indican las tres galaxias LSB detectadas en este campo.

### 2.3. Obtención de parámetros fotométricos y estructurales de las galaxias LSB

#### 2.3.1. Cálculo de los perfiles de brillo superficial

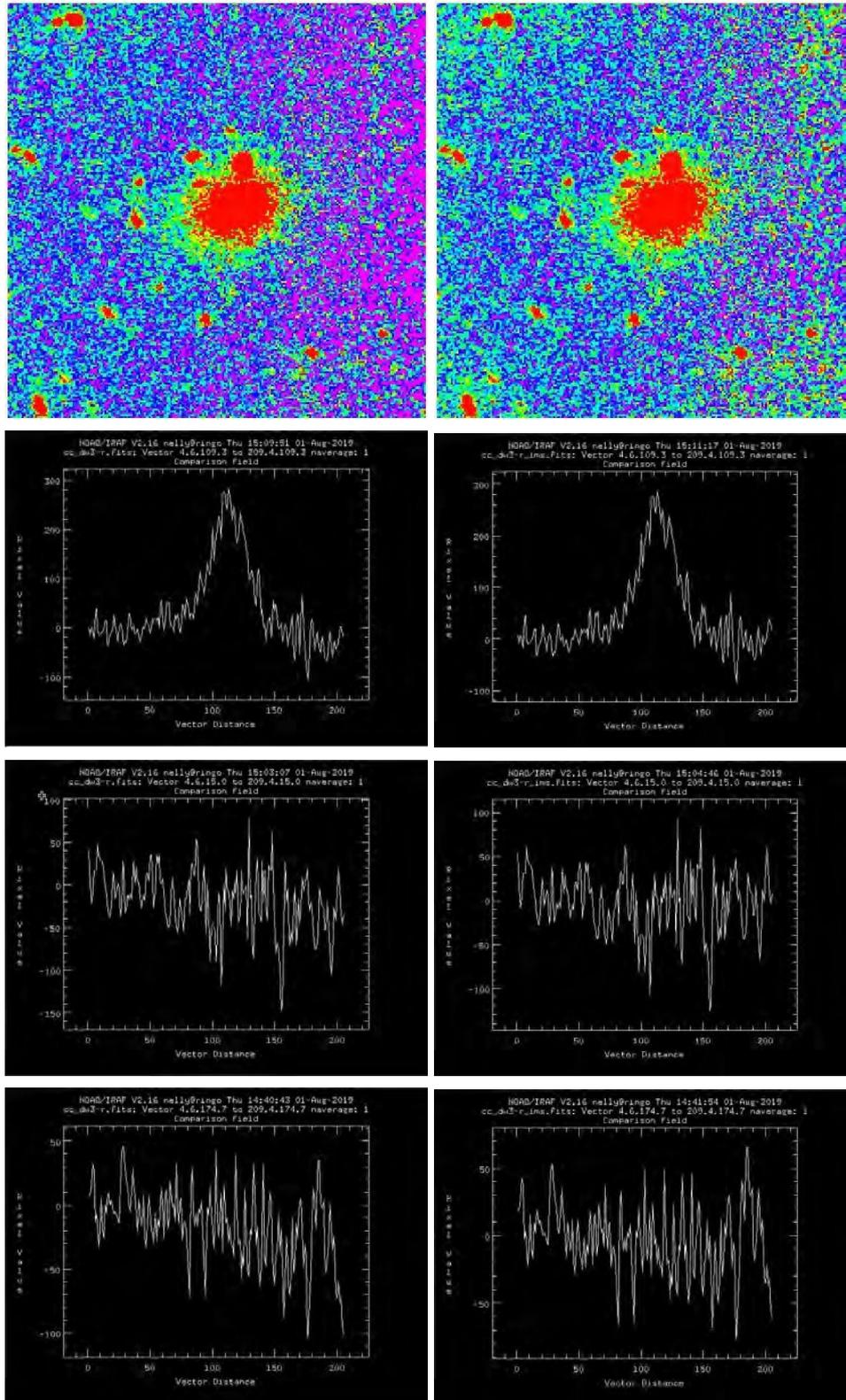
Para obtener los perfiles de brillo superficial de cada una de las candidatas a galaxias LSB, se realizaron dos pasos. El primero consiste en sumar las imágenes de los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  que se encuentran alineadas y que tienen el cielo restado, con el objetivo de generar una mejor relación señal-ruido para estos objetos y así poder obtener perfiles de brillo superficial confiables para cada galaxia LSB. En esta imagen suma, y luego de enmascarar todos los objetos cercanos, se ejecuta la tarea `ellipse` considerando el centro, la elipticidad y el ángulo de posición libres para que la tarea ajuste estos parámetros de modo que resulten ser los representativos de estas candidatas a galaxias LSB. El segundo paso consistió en ejecutar nuevamente la tarea `ellipse` pero ahora en las imágenes correspondientes a los filtros individuales, y fijando los parámetros a los obtenidos a partir de la imagen suma. Esto puede hacerse debido a que en todas las imágenes los objetos muestran morfologías suaves y difusas sin mostrar evidencias obvias de subestructura interna (barras, bandas de polvo, etc.) o gradientes de color en sus mapas de color.

Como resultado de este procedimiento, se obtuvo información fotométrica instrumental en los distintos filtros para cada una de las galaxias LSB. Para construir los perfiles de brillo superficial instrumental (se designan por simplicidad  $\mu(r)_{g_{\text{ins}}}$ ,  $\mu(r)_{r_{\text{ins}}}$  y  $\mu(r)_{i_{\text{ins}}}$ , respectivamente), de la tabla de salida de la tarea `ellipse`, se extrajeron los campos SMA, MAG, MAG\_LERR, MAG\_UERR. Aquí, el campo SMA contiene la longitud del semieje mayor medida en píxeles, el campo MAG corresponde al brillo superficial instrumental, y sus errores se encuentran contenidos en los dos últimos campos, en unidades de  $\text{mag píxel}^{-2}$ .

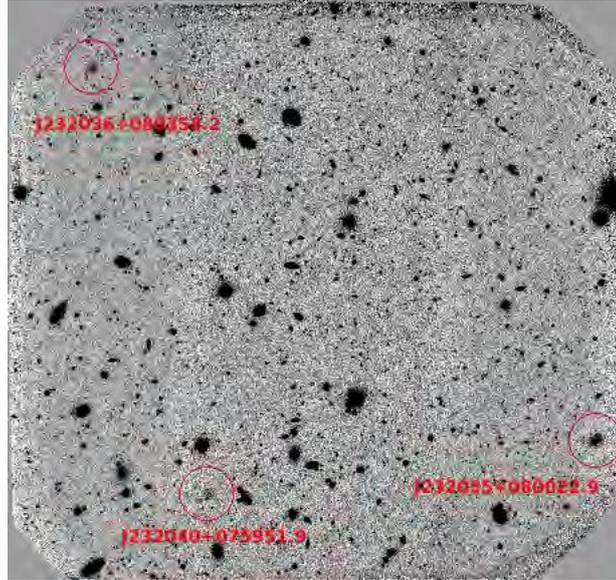
Una vez obtenidos los perfiles de brillo, se procedió a evaluar la calidad del nivel de cielo adoptado. Para ello, se utilizó la tarea `endereza` la cual no es propia de IRAF, sino que es una aplicación creada por el Dr. Sergio A. Cellone, y permite recalcular el perfil de brillo superficial variando ligeramente el nivel de cielo. Para ello, y a partir del gráfico de la curva de crecimiento construido como “TFLUX\_E vs SMA”, esta tarea permite al usuario sumar o restar valores constantes en forma interactiva hasta que dicha curva presente un comportamiento asintótico constante.

Esta tarea crea 6 nuevas columnas en las tablas de `ellipse`: “INTENS\_2”, “MAG\_2”, “TFLUX\_E\_2”, “MAG\_LERR\_2”, “MAG\_UERR\_2”. Las nuevas columnas equivalen a las columnas originales correspondientes (sin el “\_2”), corregidas por el nuevo valor de cielo. De esta manera, el perfil instrumental con el cielo corregido se construirá a partir de la columna “MAG\_2” considerando sus errores inferior (“MAG\_LERR\_2”) y superior (“MAG\_UERR\_2”). Cabe mencionar que para evitar valores indefinidos

### 2.3. Obtención de parámetros fotométricos y estructurales de las galaxias LSB



**Figura 2.15.** Ejemplo de sustracción del nivel de cielo en torno a la candidata PEG J232055+080022.9. En el panel superior izquierdo se muestra la imagen en el filtro  $r'$ , en la cual se aprecia el leve gradiente en el nivel de cielo. En el panel superior derecho se muestra la imagen con la sustracción de la variación del nivel de cielo mediante la tarea `imsurfit`. En los paneles inferiores se muestran las distribuciones de brillo en torno a la galaxia LSB con diferentes cortes. En la columna derecha se aprecian las menores variaciones en torno a la candidata a galaxia LSB. El tamaño de la imagen es de  $31 \times 31$  arcsec.



**Figura 2.16.** Imagen en el filtro  $r'$  del campo de comparación del grupo de Pegasus I. Los círculos rojos indican la ubicación de las galaxias LSB encontrada en este campo.

(“INDEF”) la tarea **endereza** permite establecer un límite inferior para el parámetro “MAG\_2”. En nuestro caso, “MAG\_2” se limita a  $27.5 \text{ mag píxel}^{-2}$ .

Debido a que los perfiles de brillo superficial son extremadamente débiles y están fuertemente afectados por el nivel de cielo, los errores obtenidos de las tablas de **ellipse** se encuentran subestimados. Por ese motivo, para tener una mejor estimación de los errores del estudio fotométrico de estas galaxias LSB se procedió de la siguiente manera:

1. Se define una región máxima hasta donde se considera que llega la galaxia. Esta región se considera observando la suma de las imágenes instrumentales en los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  y los mapas de color (ver Sección 2.3.4). Definida esta región, tomamos un radio máximo,  $R$ , el cual es considerado para corregir en su entorno al perfil de brillo utilizando la aplicación **endereza**, y estimar la variación del nivel de cielo. Una aclaración importante es que este radio  $R$  no es exactamente el radio total que se utilizó para calcular las magnitudes integradas, sino que se considera solo para analizar el cielo en torno a la galaxia.
2. Se calculó el nivel de cielo medio de las imágenes finales (de las que se sustrajeron los objetos que afectan a los perfiles de las galaxias LSB) en torno a la misma región, para eso se hace:

$$X_M = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (2.1)$$

Estos valores se obtienen midiendo directamente sobre las imágenes, utilizando la opción “m” de la tarea **imexamine**. Siendo  $x_i$  el valor estadístico, la MEDIAN, en torno a un punto del cielo y  $n$  la cantidad de puntos seleccionados para obtener el nivel de cielo medio.

3. Se calculó la desviación estándar,  $\sigma$ , del nivel de cielo con el fin de utilizar ese valor para variar con la tarea **endereza** los perfiles de brillo y así estimar mejor los

### 2.3. Obtención de parámetros fotométricos y estructurales de las galaxias LSB

errores fotométricos (por ej. perfiles de brillo superficiales, magnitudes integradas,  $\mu_{\text{eff}}$ ,  $r_{\text{eff}}$ , etc.). Es decir,  $\sigma$  se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_M - x_i)^2}{n - 1}}. \quad (2.2)$$

donde  $X_M$ ,  $x_i$  y  $n$  representan los mismos parámetros que en el ítem anterior.

4. Para estimar los errores en los perfiles de brillo para cada filtro  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  utilizando la tarea `endereza` se sumó y restó la desviación estándar sobre los perfiles originales. Luego, los errores se calcularon utilizando las siguientes expresiones:

$$\text{lerr}(r)_{\mu,\lambda} = \sqrt{[(\mu(r) - \mu(r)_{\text{lerr}})_{\lambda}^2 + \text{MAG\_LERR\_2}_{\lambda}^2]} \quad (2.3)$$

$$\text{uerr}(r)_{\mu,\lambda} = \sqrt{[(\mu(r) - \mu(r)_{\text{uerr}})_{\lambda}^2 + \text{MAG\_UERR\_2}_{\lambda}^2]} \quad (2.4)$$

donde  $\mu(r)$  es el perfil de brillo superficial final corregido por el nivel de cielo,  $\mu(r)_{\text{uerr}}$  es el perfil de brillo superficial que tiene sumada la  $\sigma$ ,  $\mu(r)_{\text{lerr}}$  es el perfil de brillo superficial que tiene restada la  $\sigma$ , `MAG_UERR_2` error superior del perfil original, `MAG_LERR_2` error inferior del perfil original y  $\lambda$  depende de cuál filtro corresponda el error.

#### 2.3.2. Calibración al Sistema Estándar

Como ya se ha mencionado, los datos fotométricos obtenidos con la tarea `ellipse`, son instrumentales. Para que puedan ser analizados y comparados con los presentados en otros trabajos de la literatura, deben ser transformados al sistema estándar. En este caso, siendo imágenes obtenidas con Gemini-GMOS, se los transformó al sistema SDSS. De esta forma, la transformación del perfil de brillo superficial al sistema estándar, en  $\text{mag arcsec}^{-2}$ , está dada por:

$$\mu(r) = \mu(r)_{\text{ins}} + 2.5 \log(\text{esc}^2 t_{\text{exp}}) - k (\text{airmass} - 1.0) + Zp, \quad (2.5)$$

donde  $\text{esc}$  es la escala del detector ( $0.''146 \text{ píxel}^{-1}$ ),  $t_{\text{exp}}$  el tiempo de exposición,  $\text{airmass}$  la masa de aire (ver Tabla 2.1),  $k$  el coeficiente de extinción atmosférica media en Mauna Kea, obtenido de la página web del Observatorio Gemini<sup>2</sup> (ver Tabla 2.2). Por otra parte,  $Zp$  es la constante de punto de cero para pasar al sistema estándar, siendo sus valores  $Z_{g'}$ ,  $Z_{r'}$  o  $Z_{i'}$ , dependiendo si la transformación es al filtro  $g'$ ,  $r'$  o al filtro  $i'$ , y dependiendo del campo a cual corresponda (ver en Tabla 2.1). Estos valores fueron obtenidos a partir del campo de estrellas estándar observado en nuestros programas de observación, para más detalle ver Faifer et al., (paper en preparación).

Los perfiles deben ser corregidos también por extinción y enrojecimiento interestelar. Para ello, las extinciones fueron obtenidas a través de la base de datos NED<sup>3</sup>, los que a su vez, provienen de Schlafly & Finkbeiner (2011). Por lo tanto, la corrección para brillo superficial en los diferentes filtros es:

<sup>2</sup><https://www.gemini.edu/sciops/instruments/gmos/calibration/photometric-stds>

<sup>3</sup><https://ned.ipac.caltech.edu/>

$$\mu(r)_0 = \mu(r) - A_\lambda, \quad (2.6)$$

donde  $A_\lambda$  debe ser reemplazada por  $A_{g'}$ ,  $A_{r'}$  o  $A_{i'}$  dependiendo de cuál filtro corresponda la corrección del brillo (ver en Tabla 2.2).

Filtro	$k$	$A$	$A_c$
$g'$	0.14	0.2882	0.331
$r'$	0.11	0.2091	0.229
$i'$	0.10	0.1585	0.170

**Tabla 2.2.** Se muestran los valores de los coeficientes de extinción,  $k$ , relativos a cada filtro en Mauna Kea.  $A$  representa la extinción para los campos 1-8 y  $A_c$  representa la extinción del campo de comparación para el grupo de Pegasus I.

### 2.3.3. Cálculo de magnitudes y colores integrados, radios efectivos y brillos superficiales efectivos medios

Las magnitudes integradas en cada filtro se calcularon integrando, numéricamente, el perfil de brillo superficial calibrado al sistema estándar, desde el centro de la galaxia hasta el radio total. El radio total,  $r_{\text{tot}}$ , considerado corresponde al radio equivalente al cual la curva de crecimiento se estabiliza en los tres filtros.

Obtenidas estas magnitudes, el color integrado se encuentra haciendo la resta entre las magnitudes en los filtros considerados para cada una de las galaxias.

Recordando que el radio efectivo,  $r_{\text{eff}}$ , se define como el radio equivalente de la isofota que encierra la mitad del flujo integrado, se tomó de la tabla de salida que fue corregida por el nivel de cielo residual con la tarea `endereza`, el valor de `TFLUX_E_2` correspondiente al primer SMA que se avecina al valor del  $r_{\text{tot}}$ , como una aproximación al flujo total integrado. Luego, haciendo `TFLUX_E_2/2.0` se buscó el SMA aproximado al que le corresponde ese valor, siendo dicho SMA (transformado a radio equivalente) el radio efectivo adoptado en esta tesis.

Por último, también se calculó el brillo superficial efectivo medio,  $\langle \mu_{\text{eff}} \rangle$ , dado por

$$\langle \mu_{\text{eff}} \rangle = \text{mag} + 2.5 \log(2\pi r_{\text{eff}}^2) \quad (2.7)$$

en donde el  $r_{\text{eff}}$  debe estar en segundos de arco y  $\text{mag}$  es la magnitud integrada.

Los errores correspondientes a las magnitudes integradas, colores y los parámetros estructurales,  $r_{\text{eff}}$  y  $\langle \mu_{\text{eff}} \rangle$  se calcularon considerando los errores de los perfiles de brillo superficial. En la Tabla 3.1, se pueden ver los resultados obtenidos.

### 2.3.4. Mapas y perfiles de color

Para obtener los mapas de color ( $g' - r'$ ) o ( $g' - i'$ ) de las galaxias LSB, como se explicó en la Sección 2.1 es muy importante tener las imágenes alineadas, esto significa que cada una de las galaxia debe tener la misma posición relativa en los tres filtros  $g'$ ,

### 2.3. Obtención de parámetros fotométricos y estructurales de las galaxias LSB

$r'$  e  $i'$  porque permite hacer las operaciones necesarias entre las imágenes, sin generar efectos espurios.

Otro punto importante a considerar es que el mapa de color se arma a partir de dos imágenes. Si el *seeing* en las dos imágenes es muy distinto, esto implica que la calidad de las imágenes no será la misma, entonces es necesario degradar la imagen con el menor valor de *seeing* al valor de la segunda imagen. Esto se puede realizar, por ejemplo, con la tarea `gauss` de IRAF.

Una vez que las imágenes fueron degradadas, se las transformó al sistema SDSS corregidas por extinción y enrojecimiento interestelar. De manera similar a cómo se realizó la transformación del perfil de brillo superficial al sistema estándar, es decir, para los diferentes filtros se utilizó la tarea `imcalc` para aplicar dicha transformación de la siguiente manera:

$$im_0 = -2.5 \log(im_{ins}/(esc^2 t_{exp})) - k (airmass - 1.0) + Zp - A_\lambda, \quad (2.8)$$

donde, como en la Sección 2.3.2,  $esc$  es la escala del detector,  $t_{exp}$  el tiempo de exposición,  $airmass$  la masa de aire,  $k$  el coeficiente de extinción atmosférica media en Mauna Kea,  $Zp$  es la constante de punto de cero para pasar al sistema estándar,  $A_\lambda$  coeficiente de extinción galáctica,  $im_{ins}$  imagen instrumental y finalmente  $im_0$  es la imagen en el sistema SDSS corregida por extinción y enrojecimiento interestelar.

A continuación, se generó, para cada una de las imágenes, una nueva imagen utilizando un filtro de mediana con la tarea `median` de IRAF. Esta tarea emplea el cálculo de la mediana de la distribución de píxeles en una caja de tamaño  $n \times n$  (con  $n$  impar) que se desplaza por toda la imagen, asignando al píxel central de dicha caja, el valor de mediana calculado. De esta manera, según el tamaño de caja adoptado, se atenúa la componente de ruido y se obtiene una imagen más suave. Tras algunas pruebas, en esta tesis se optó por aplicar la mencionada tarea utilizando una caja de  $3 \times 3$  píxeles ( $0.438 \times 0.438$  arcsec).

Dadas las imágenes correctamente centradas, degradadas, pasadas al sistema SDSS corregida por extinción y enrojecimiento, y filtradas por mediana, se obtuvo el mapa de color de cada galaxia de la muestra. Esto se realizó mediante la tarea `imarith`, realizando la resta entre las imágenes.

Una vez obtenidas las imágenes degradadas, se pasó a obtener los perfiles de color en base a dichas imágenes. Para ello, se utilizó el programa `ellipse`. Se mantuvieron exactamente los mismos parámetros de ajuste que se utilizaron para obtener los perfiles de brillo superficial (ver Sección 2.3.1).

Además, en cada una de ellas se utilizó una máscara diferente para no considerar en los ajustes de isofotas, objetos brillantes o zonas malas de la imagen. Como resultado de este procedimiento, se obtuvo información fotométrica instrumental en los distintos filtros para cada una de las galaxias. Para construir los perfiles de brillo superficial instrumental se procedió de la misma manera que en la Sección 2.3.1.

Una vez obtenidos estos perfiles de brillo instrumental a partir de las imágenes degradadas, se verificó el nivel del cielo de cada uno de ellos, utilizando la tarea `endereza`.

Corregidos los perfiles de brillo superficial instrumental por el nivel del cielo. El paso siguiente es calibrar estos perfiles al sistema estándar SDSS y corregirlos por extinción y enrojecimiento siguiendo los pasos que se indican en la Sección 2.3.2. Luego, es posible construir los perfiles de color realizando la resta entre los perfiles de brillo superficial,

es decir,

$$\mu_{(g'-i')_0} = \mu(r)_{g'_0} - \mu(r)_{i'_0} \quad \text{o} \quad \mu_{(g'-r')_0} = \mu(r)_{g'_0} - \mu(r)_{r'_0}. \quad (2.9)$$

Para calcular los errores primero se debe calcular los errores de los perfiles de brillo superficial de igual manera que en la Sección 2.3.1, obtenidos los errores  $\text{lerr}(r)_{\mu,\lambda}$  y  $\text{uerr}(r)_{\mu,\lambda}$ . Luego, los errores de los perfiles de color se calcularon utilizando las siguientes expresiones:

$$\text{lerr}(r)_{\mu_{(g'-\lambda)}} = \sqrt{\text{lerr}(r)_{\mu,g'}^2 + \text{lerr}(r)_{\mu,\lambda}^2} \quad (2.10)$$

$$\text{uerr}(r)_{\mu_{(g'-\lambda)}} = \sqrt{\text{uerr}(r)_{\mu,g'}^2 + \text{uerr}(r)_{\mu,\lambda}^2} \quad (2.11)$$

donde  $\lambda$  depende si corresponde al filtro  $r'$  e  $i'$ .

### 2.3.5. Ajuste de los perfiles de brillo: Ley de Sérsic

Debido a que los perfiles de brillo superficial son extremadamente bajos para nuestros objetos, se decidió comparar los parámetros independientes del modelo con los obtenidos con un ajuste de la ley de Sérsic (Sérsic 1968) en sus perfiles de brillo superficial. Para parametrizar estos perfiles de brillo superficial de cada galaxia LSB de la muestra considerada, se realizaron ajustes en los tres filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ , obteniendo así los valores de los índices de Sérsic  $n$  para todas las candidatas. Dichos ajustes están dados por:

$$\mu(r) = \mu_0 + 1.0857 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{1/n}, \quad (2.12)$$

donde  $\mu_0$  es el brillo superficial central y  $r_0$  es un parámetro de escala. Debido a su dependencia matemática simple de los parámetros libres, se decidió usar la fórmula anterior en lugar de:

$$\mu(r) = \mu_{\text{eff}} + 1.0857 b_n \left[ \left( \frac{r}{r_{\text{eff}}} \right)^{1/n} - 1 \right], \quad (2.13)$$

donde  $b_n \simeq 1.9992 n - 0.3271$  para  $0.5 < n < 10$  (Graham & Worley 2008, y referencias ahí citadas). Hay relaciones simples entre las cantidades involucradas en ambas ecuaciones (por ej. MacArthur et al. 2003):

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_0 + 1.0857 b_n \quad (2.14)$$

$$r_{\text{eff}} = r_0 b_n^n. \quad (2.15)$$

En la Tabla 3.2 se presentan los parámetros estructurales de las galaxias LSB detectadas obtenidos a partir del ajuste de la Ecuación 2.12 a sus perfiles de brillo superficial. Las magnitudes integradas totales también se obtuvieron de la expresión:

$$\text{mag}_{\text{tot}} = \mu_{\text{eff}} - 1.995450 - 5 \log(r_{\text{eff}}) - 1.0857 b_n - 2.5 \log \left[ b_n^{-2n} n \Gamma(2n) \right] \quad (2.16)$$

Los ajustes se realizaron utilizando el comando FIT del programa *gnuplot*, que calcula mediante el método de “mínimos cuadrados” el mejor ajuste para un cierto conjunto

### 2.3. Obtención de parámetros fotométricos y estructurales de las galaxias LSB

---

de puntos respecto de una función dada. Es necesario para realizar el ajuste definir la función que será minimizada, los parámetros libres de la misma, el conjunto de valores iniciales de dichos parámetros y en este caso el rango de ajuste.

Para definir dicho rango de ajuste, se deben tener en cuenta los efectos de *seeing* que afectan principalmente a las regiones más internas de la galaxia. A su vez, las partes externas de los perfiles observados son muy ruidosas, ya que estas regiones son muy sensibles a la calidad de la sustracción del cielo. Para minimizar estos efectos y poder lograr un ajuste confiable del perfil, se realizaron diversos ajustes variando la región interna y externa. Comparándose los resultados se encontró que los mejores resultados, se obtuvieron excluyendo la región interna que se corresponden al *seeing* de la imágenes y la región externa fue tomada considerando el comportamiento de los ajustes del perfil y sus residuos.

En todas las galaxias, excepto la PEG J232054+080838.8 (ver Figura 3.8), se pudo realizar el ajuste del perfil con un solo modelo de Sérsic, excluyendo las regiones internas afectadas por el *seeing*. La galaxia PEG 232054+080838.8 muestra lo que parece ser un núcleo. Como primer paso, se realizó un modelo PSF de este objeto estelar con el paquete DAOPHOT dentro de IRAF. Después de restar este modelo a las imágenes originales de la galaxia, los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  mostraron algunos residuos. Esto se tomó como evidencia de que el núcleo se resuelve marginalmente en todas las imágenes. Por lo tanto, se decidió ajustar la suma de dos funciones de Sérsic a todos los perfiles  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ , sin excluir la región interna, con el objetivo de obtener parámetros estructurales para la componente central. Se probaron los resultados del ajuste compuesto, primero considerando la componente externa con  $n = 1$  y luego un ajuste con los parámetros libres para ambas componentes. Para definir cuál será el mejor ajuste, se utilizó el criterio de minimización de  $\chi^2$ . En este caso, el criterio establece que permitir que todos los parámetros varíen libremente es el mejor ajuste.



---

## Capítulo 3

# Análisis y resultados

---

### 3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color

Recordemos que en el desarrollo de esta tesis se analizaron once candidatas a galaxias LSB de tipo temprano en el grupo de Pegasus I. En las Figuras 3.1 - 3.11 se muestran, para cada una de las 11 candidatas a galaxias LSB analizadas en esta tesis, ordenadas en forma creciente según Ascensión Recta, los siguientes gráficos: en los paneles superiores se muestran los ajustes, utilizando un modelo de Sérsic, realizados a los perfiles de brillo superficial y sus respectivos residuos. En los paneles inferiores izquierdos la imagen en el filtro  $r'$  y la imagen residual que dejó la sustracción del modelo. En los paneles inferiores centrales se muestran los perfiles de color  $(g' - r')_0$  y  $(g' - i')_0$  y en los paneles inferiores derechos se muestran sus respectivos mapas de color. Cabe mencionar que los perfiles de brillo superficial y color están graficados en función del radio equivalente, definido como  $R = a\sqrt{(1 - \epsilon)}$ , siendo  $a$  el semieje mayor y  $\epsilon$  la elipticidad.

En todas las galaxias, excepto la PEG J232054+080838.8, se encontró que los perfiles de brillo superficial presentan forma cóncava (se corresponde a valores del índice de Sérsic  $\lesssim 1$ ), propiedad usualmente asociada con galaxias LSB de tipo temprano. En el caso de la galaxia PEG J232054+080838.8 muestra dos componentes: un núcleo con  $(g' - i')_0 = 1.01$  mag marginalmente resuelto en las imágenes  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ , y una componente externa con  $1.08 < n < 1.29$ , dependiendo del filtro. Es importante observar que el índice de Sérsic de la componente externa está dentro del rango esperado para galaxias LSB.

A partir de las figuras enumerados más arriba, no se puede descartar que algunos de estos objetos puedan tener un origen de marea. En los casos de PEG J232023+081331.4, PEG J232024+081209.0 y PEG J232049+080806.3, se pueden identificar algunas subestructuras extendidas y muy difusas en sus imágenes que podrían estar asociadas con este tipo de proceso (ver Figuras 3.2, 3.3 y 3.7).

Se encontró que la candidata PEG J232023+081331.4 es la galaxia más difusa y presenta los mapas de color más rojos de toda la muestra. Se observa una estructura extremadamente tenue de bajo brillo superficial conectada a la galaxia, esta estructura puede ser evidencia de un origen de marea para la galaxia, o bien, de una interacción con una estructura de marea. No es de esperar que sea un objeto de *background* porque de ser así tendría que tener un tamaño extremadamente grande.

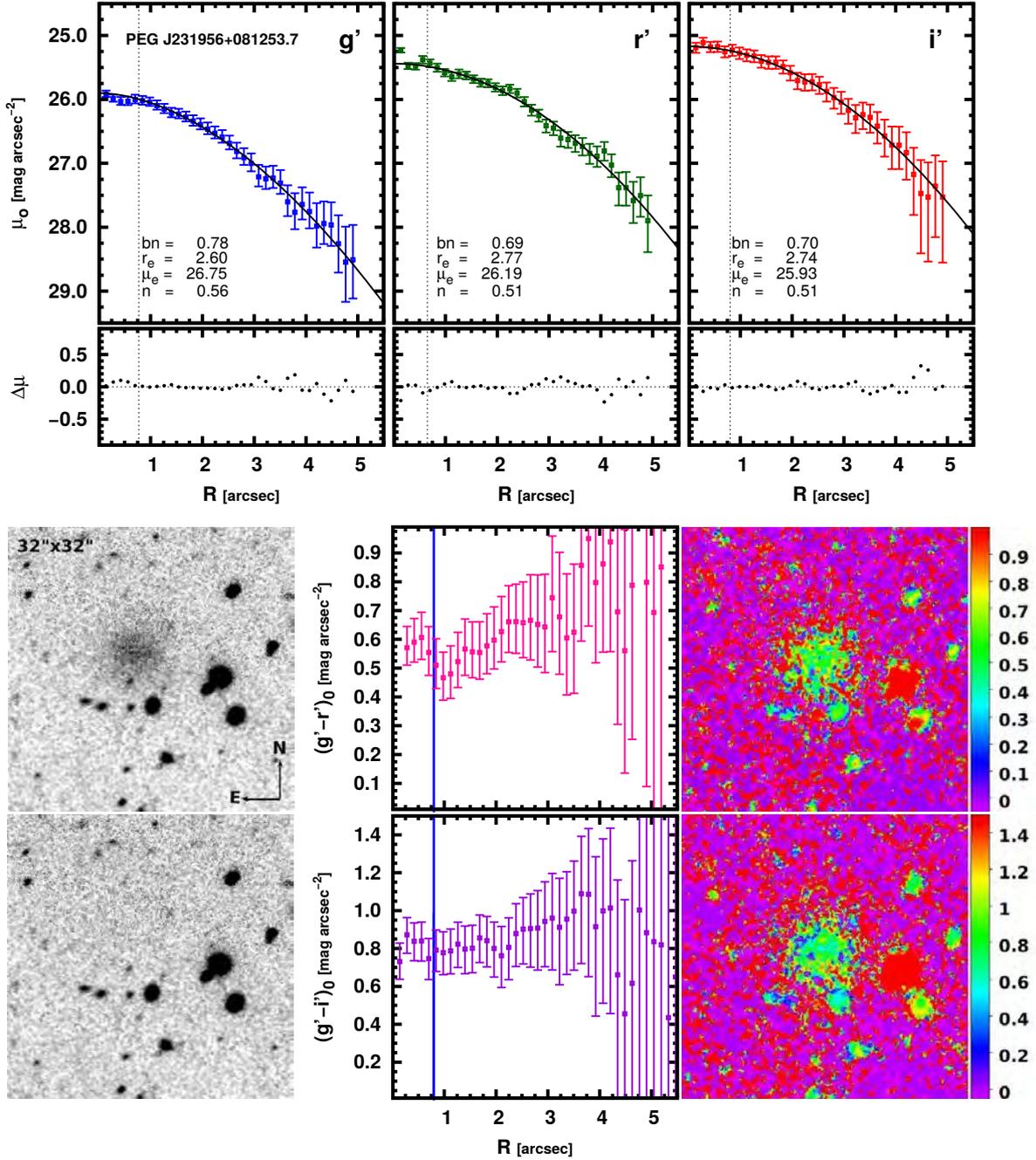
Es importante notar que debido a que los perfiles de brillo superficial son extremadamente bajos y están fuertemente afectados por el nivel de cielo, sus errores son

### 3. Análisis y resultados

---

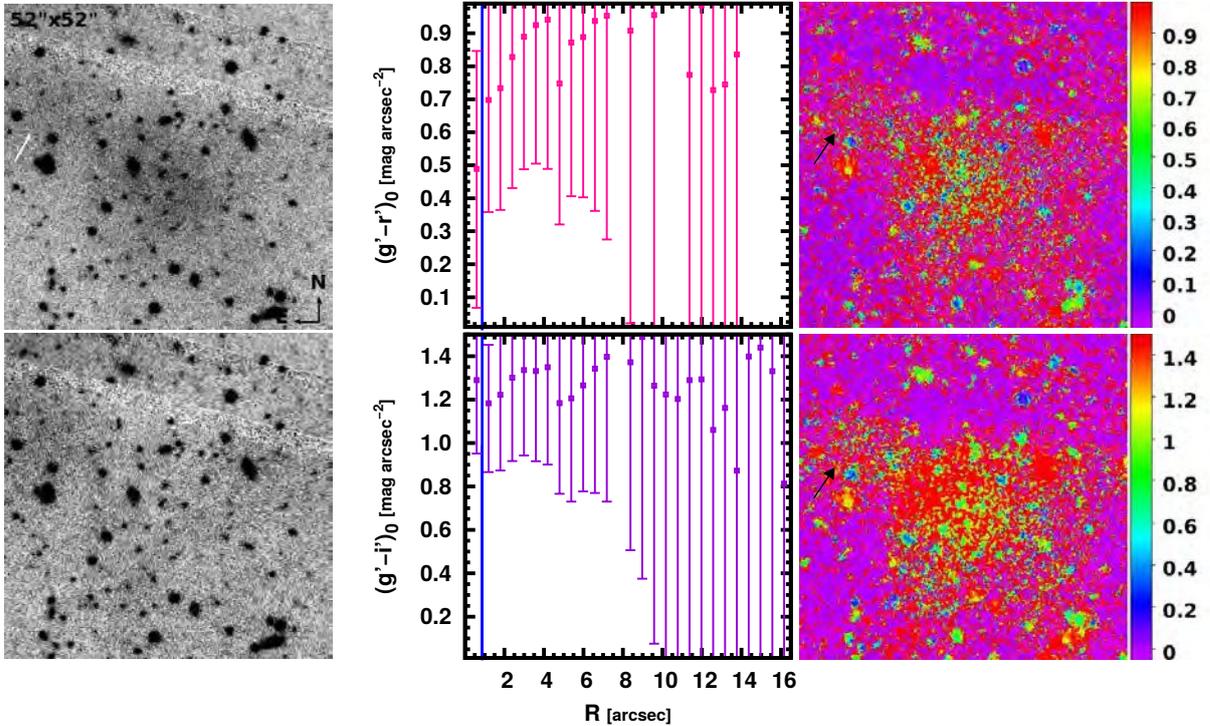
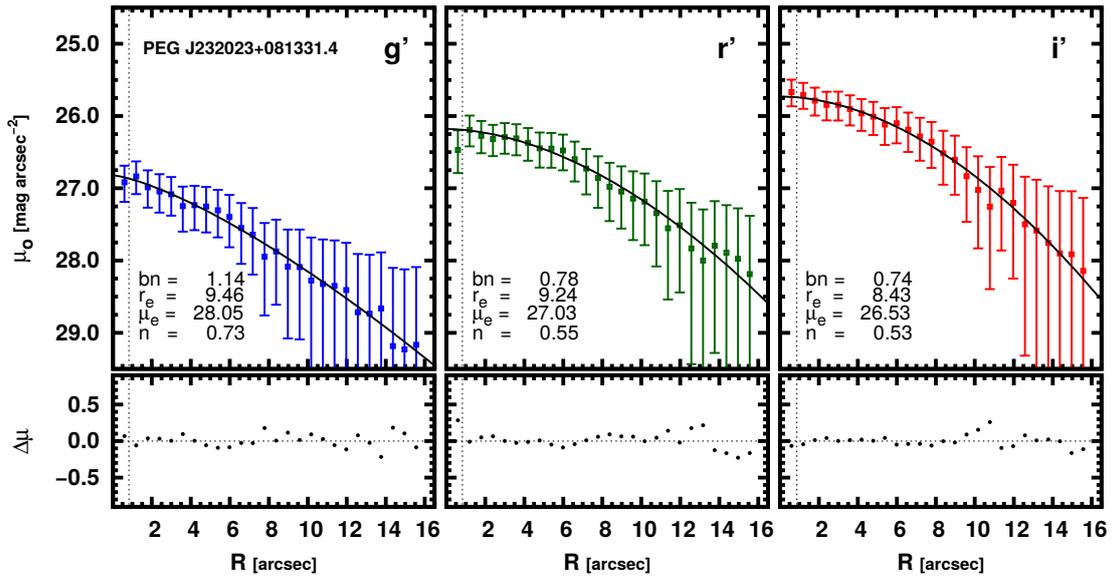
grandes, alcanzando  $\approx \pm 0.25 \text{ mag arcsec}^{-2}$  para  $\mu(g') = 27 \text{ mag arcsec}^{-2}$ , y  $\approx \pm 0.4 \text{ mag arcsec}^{-2}$  para  $\mu(r') = 27 \text{ mag arcsec}^{-2}$ . En consecuencia, dado que los perfiles de color son obtenidos a partir de los perfiles de brillo individuales, presentan errores considerablemente más grandes, llegando a unas décimas de  $\text{mag arcsec}^{-2}$  aun para las zonas centrales de las galaxias más débiles.

### 3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color



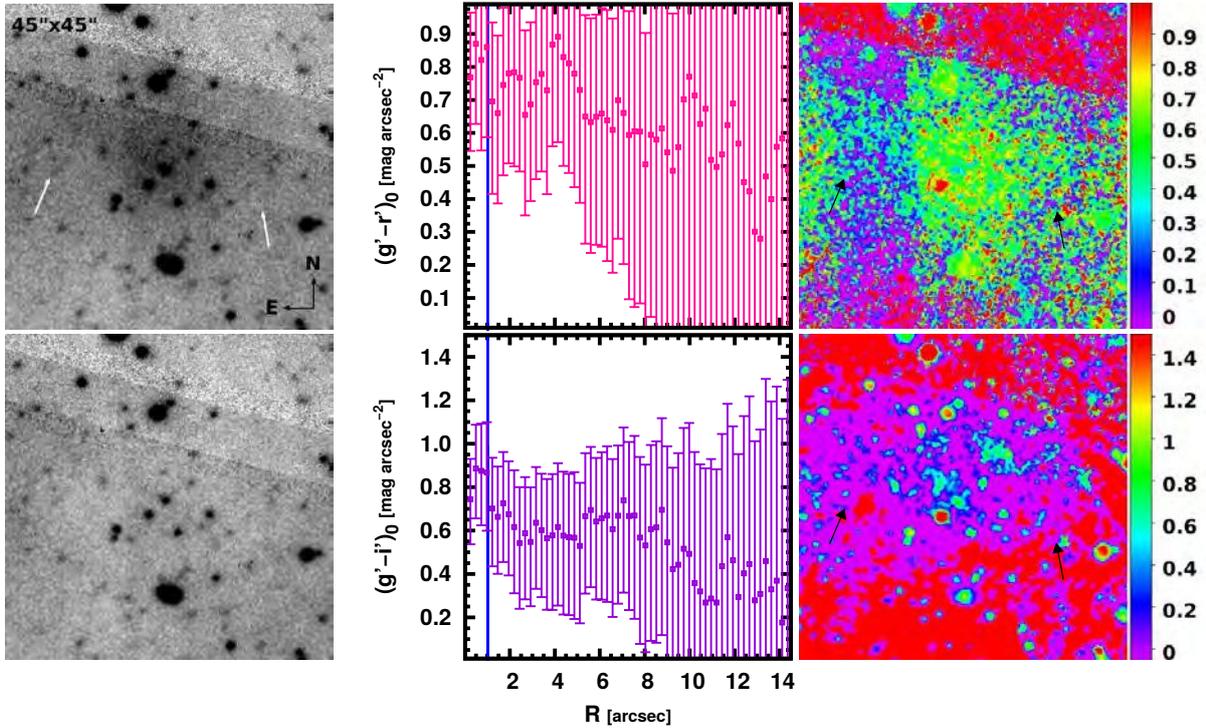
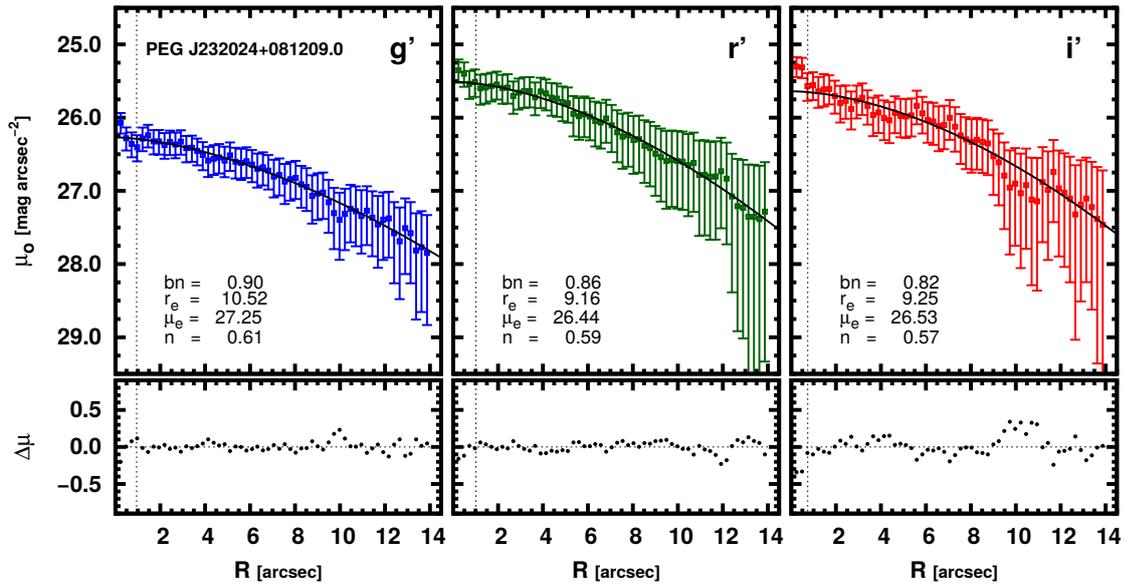
**Figura 3.1.** Paneles superiores: ajustes de la ley Sérsic a los perfiles de brillo  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  de la galaxia LSB PEG J231956+081253.7. Los residuos  $\Delta\mu = \mu(\text{obs}) - \mu(\text{fit})$  se muestran en la parte inferior. Las líneas verticales punteadas indican la región interna de los perfiles excluida para realizar los ajustes que se corresponden al *seeing* de las imágenes. Paneles inferiores izquierdos: imagen  $32 \times 32$  arcsec de la galaxia en el filtro  $r'$  de Gemini-GMOS; imagen residual en el filtro  $r'$  obtenida de la resta del modelo creado por *ellipse* y *bmodel*. Paneles inferiores centrales: se muestran los perfiles de color  $(g' - r')_0$  y  $(g' - i')_0$  de la galaxia y en los paneles inferiores derechos se muestran sus respectivos mapas de color. Las líneas verticales azules indican el mayor *seeing* de los tres filtros en las imágenes. Los perfiles están graficados en función del radio equivalente, definido como  $R = a\sqrt{(1 - \epsilon)}$ , siendo  $a$  el semieje mayor y  $\epsilon$  la elipticidad. La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar. El mapa de color  $(g' - r')_0$  parece mostrar un gradiente de color más rojo hacia la parte más externa, de acuerdo con el perfil de color, considerando su barra de error. Todos los perfiles y mapas están corregidos por extinción y enrojecimiento interestelar.

### 3. Análisis y resultados



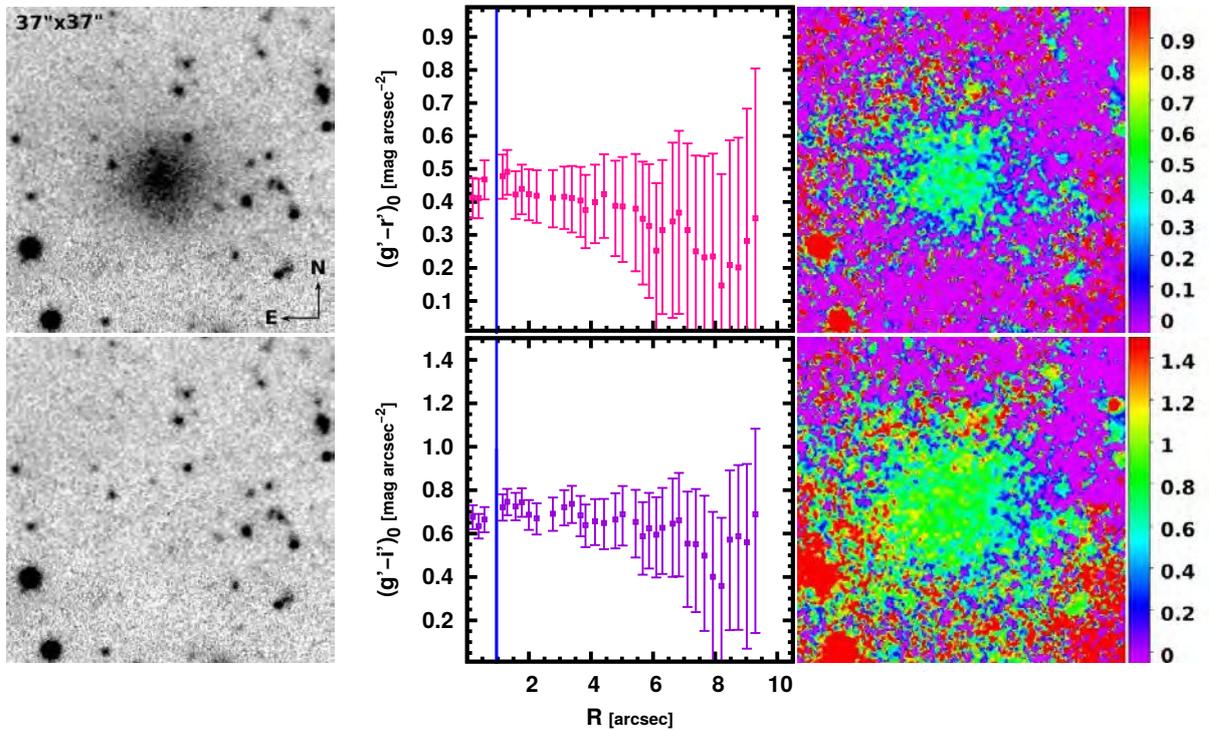
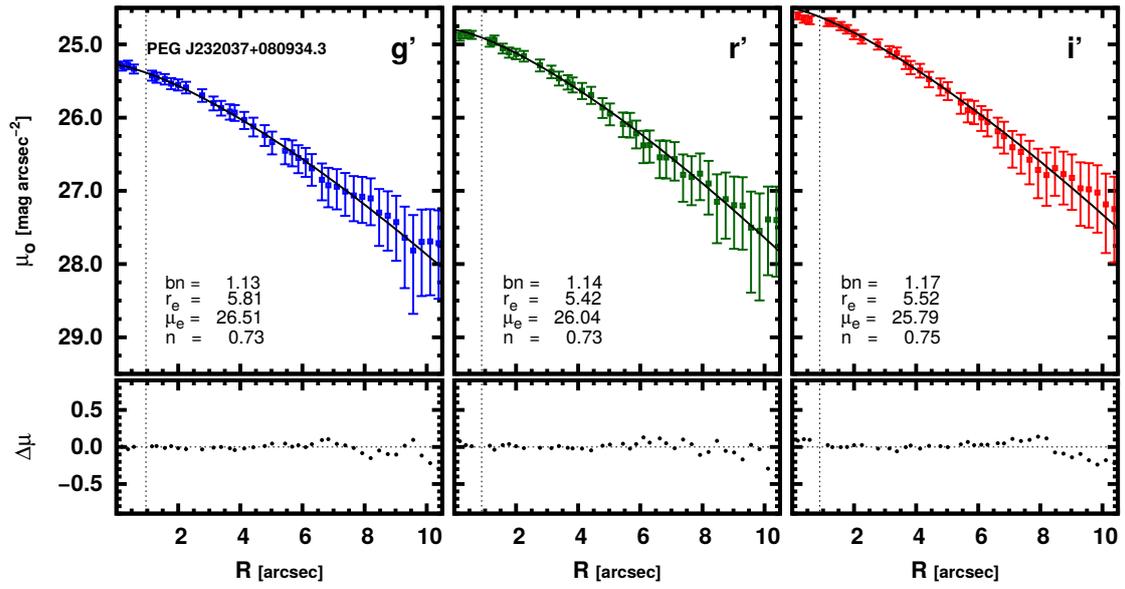
**Figura 3.2.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232023+081331.4. En este caso, el tamaño de la imagen es  $52 \times 52$  arcsec. Parece que hay una estructura extremadamente tenue de bajo brillo superficial conectada a la galaxia (flecha blanca). Esta estructura puede ser evidencia de un origen de marea para la galaxia o de una interacción con una estructura de marea. Esta estructura de marea puede estar afectando los colores de la galaxia. La galaxia se superpone al patrón de interpolación de los *gaps* entre los CCD, lo que resulta en errores fotométricos más grandes. La estructura débil señalada en la imagen Gemini-GMOS también se observa en ambos mapas de color (flecha negra). La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar. Los mapas de color son rojos, de acuerdo con los perfiles de color, considerando sus barras de error notablemente grandes.

### 3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color



**Figura 3.3.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232024+081209.0. En este caso, el tamaño de la imagen es  $45 \times 45$  arcsec. Parece que hay una estructura extremadamente tenue de bajo brillo superficial conectada a la galaxia (flechas blancas). Esta estructura puede ser evidencia de un origen de marea para la galaxia, o de una interacción con una estructura de marea. Esta estructura de marea puede estar afectando los colores de la galaxia. La estructura débil señalada en la imagen Gemini-GMOS no se observa claramente en ambos mapas de color (flechas negras). La candidata presenta perfiles de brillo superficial extremadamente bajos y fuertemente afectados por el nivel de cielo. Por esta razón, los errores resultan ser considerablemente grandes en los perfiles de color. Además, la galaxia se superpone al patrón de interpolación de los *gaps* entre los CCD afectando notoriamente a los mapas de color.

### 3. Análisis y resultados



**Figura 3.4.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232037+080934.3. En este caso, el tamaño de la imagen es  $37 \times 37$  arcsec. La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar.

### 3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color

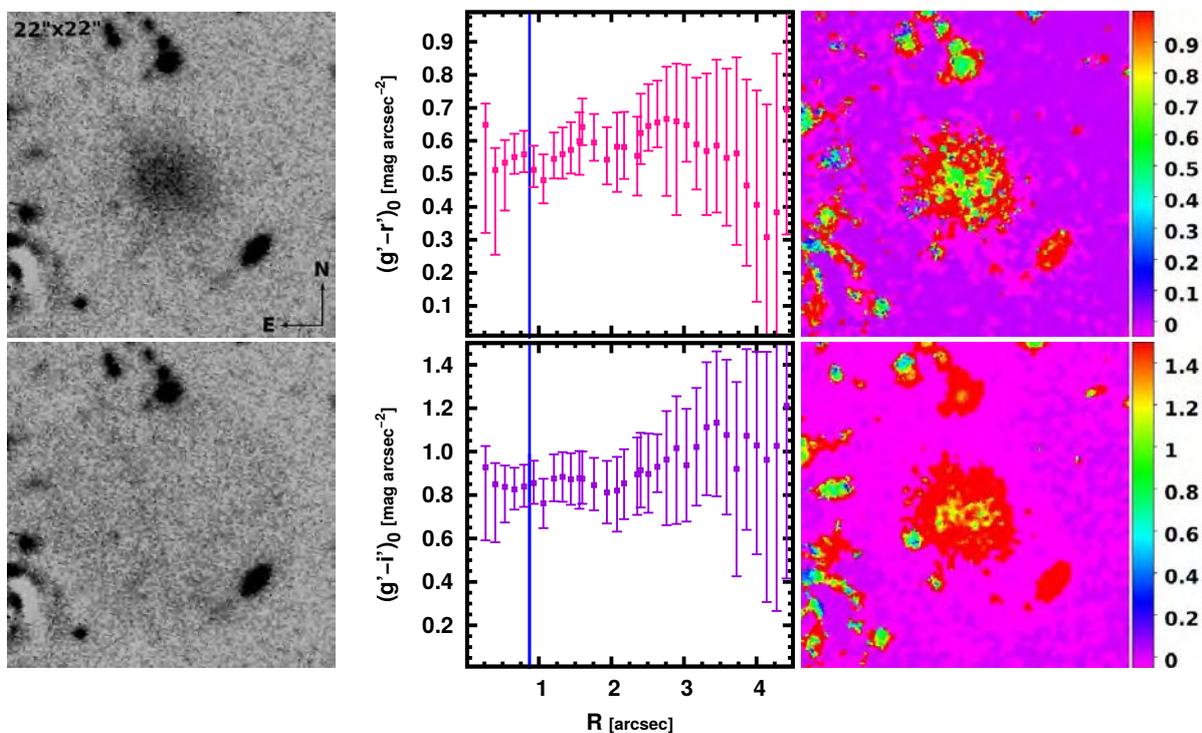
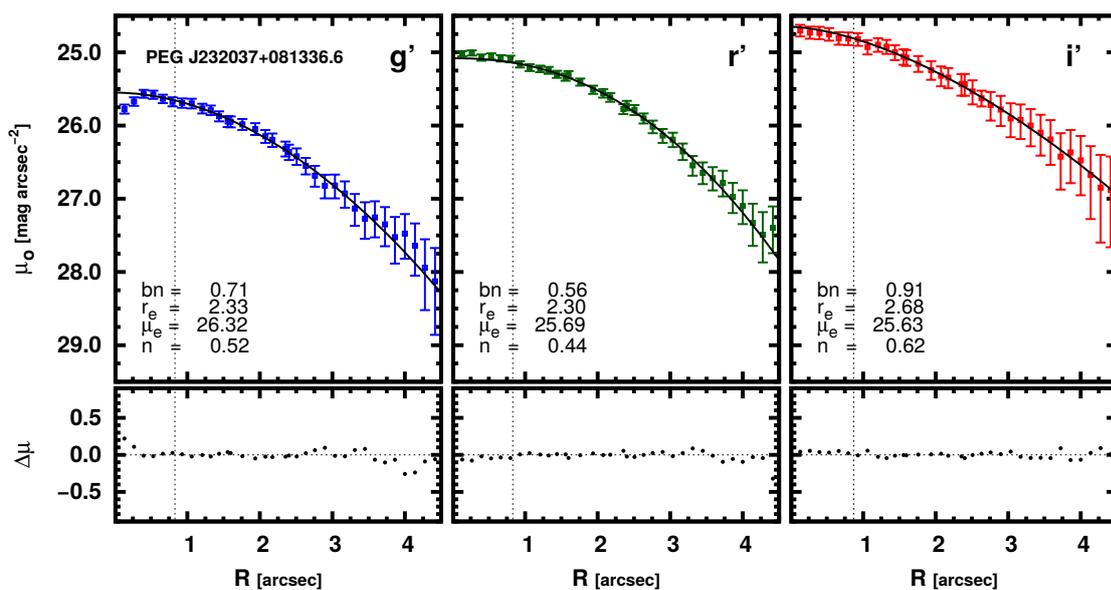
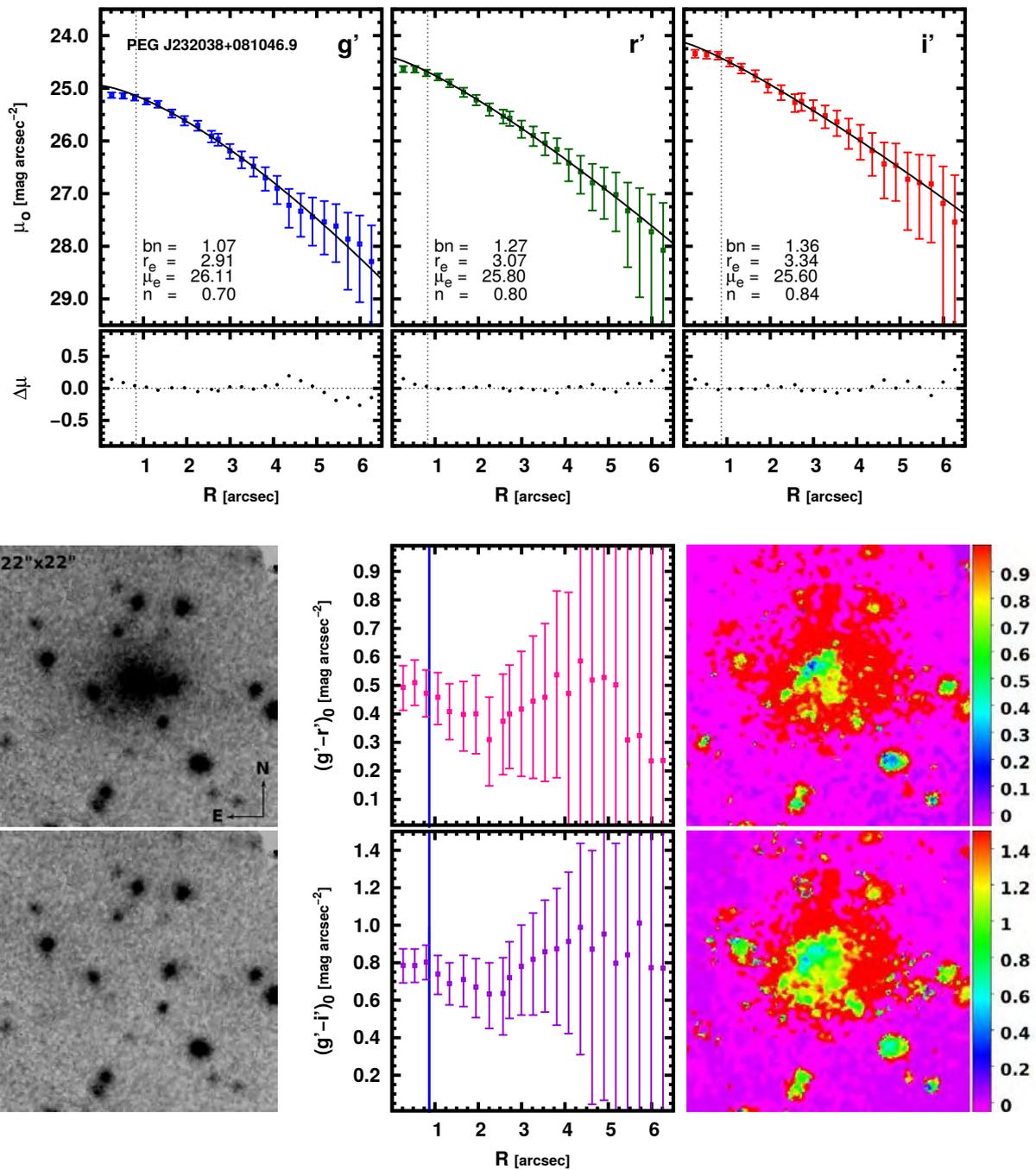


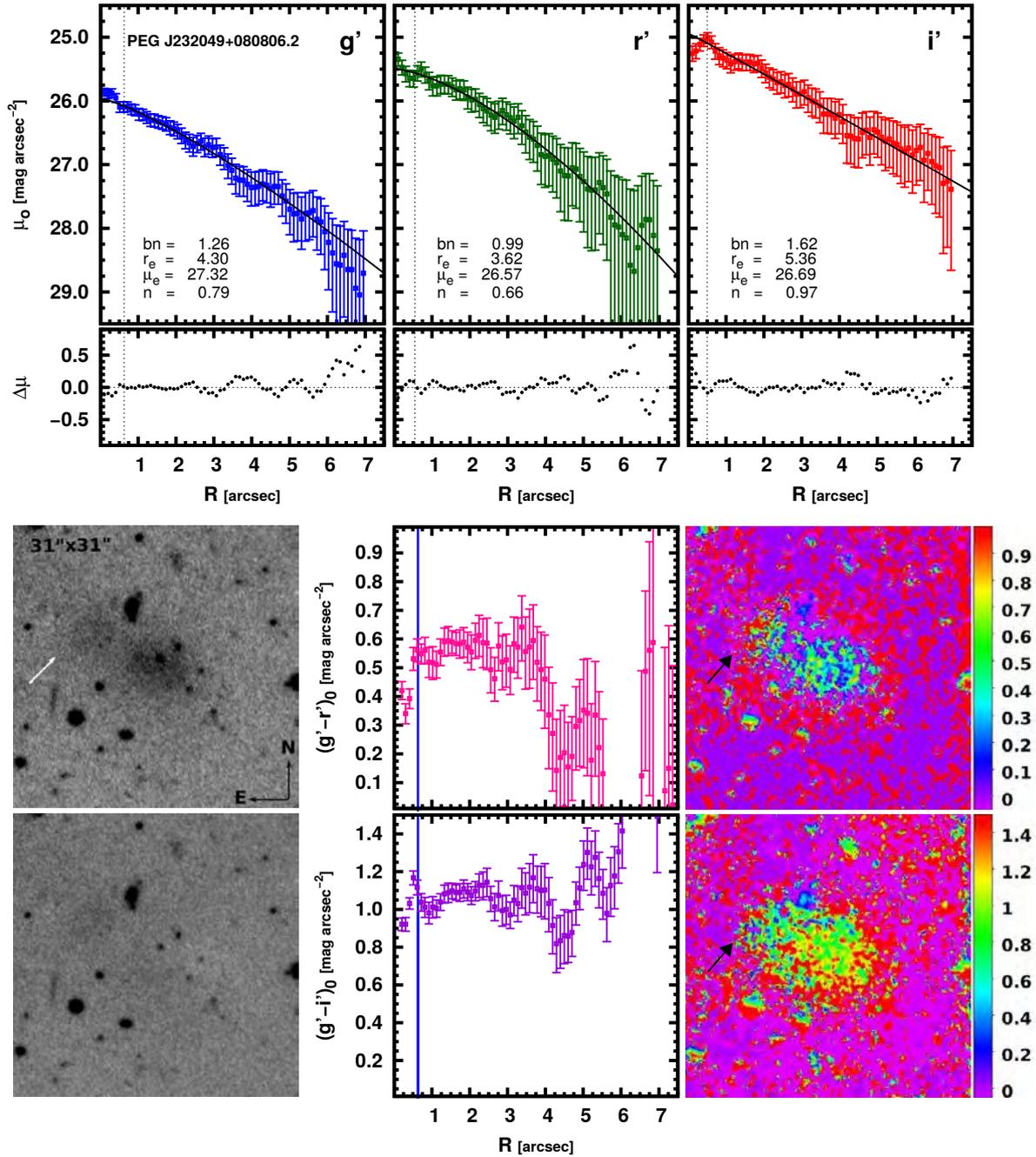
Figura 3.5. Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232037+081336.6. En este caso, el tamaño de la imagen es  $22 \times 22$  arcsec.

### 3. Análisis y resultados



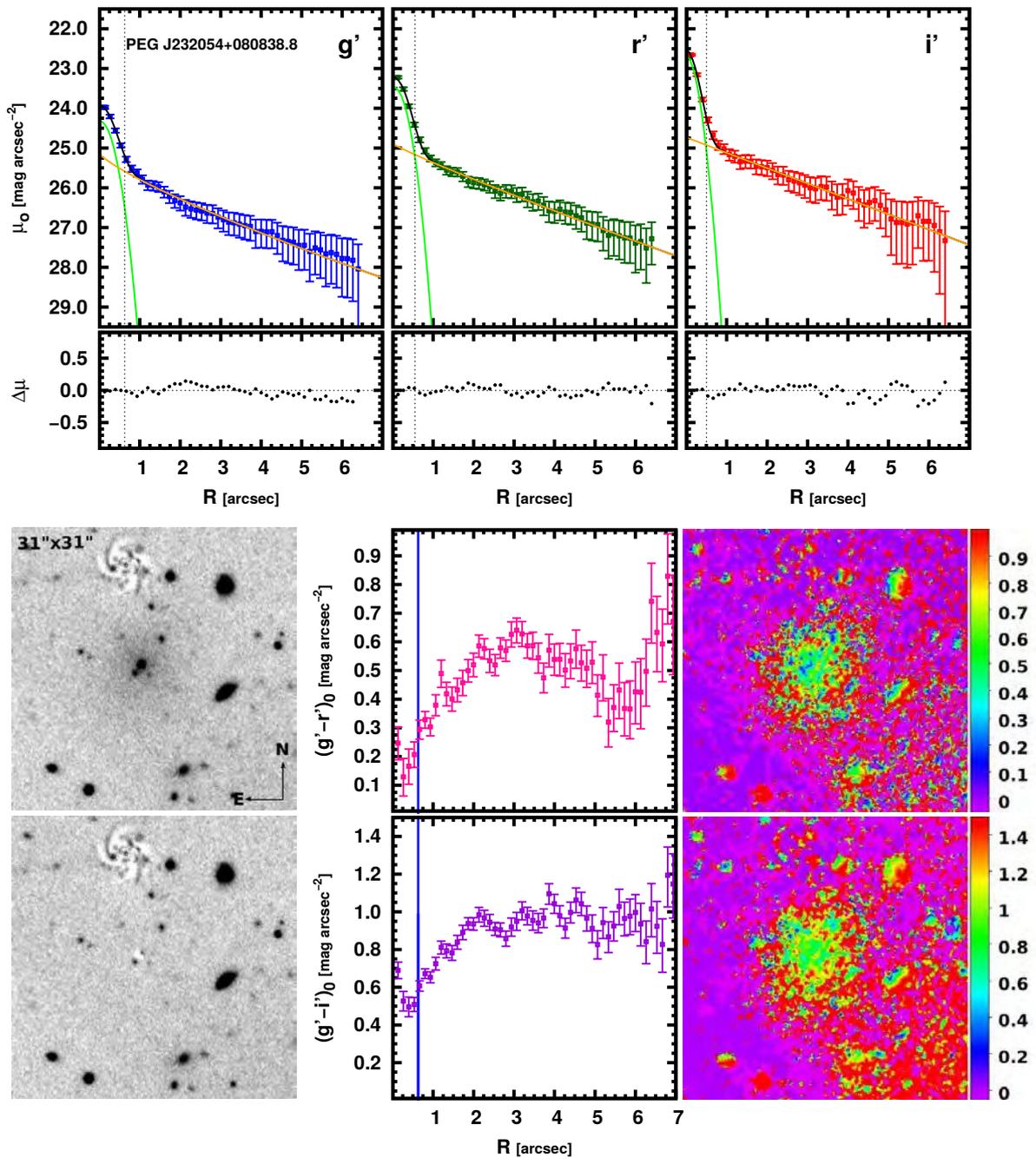
**Figura 3.6.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232038+081046.9. En este caso, el tamaño de la imagen es  $22 \times 22$  arcsec. La candidata muestra una morfología suave y regular con evidencia de formación estelar.

### 3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color



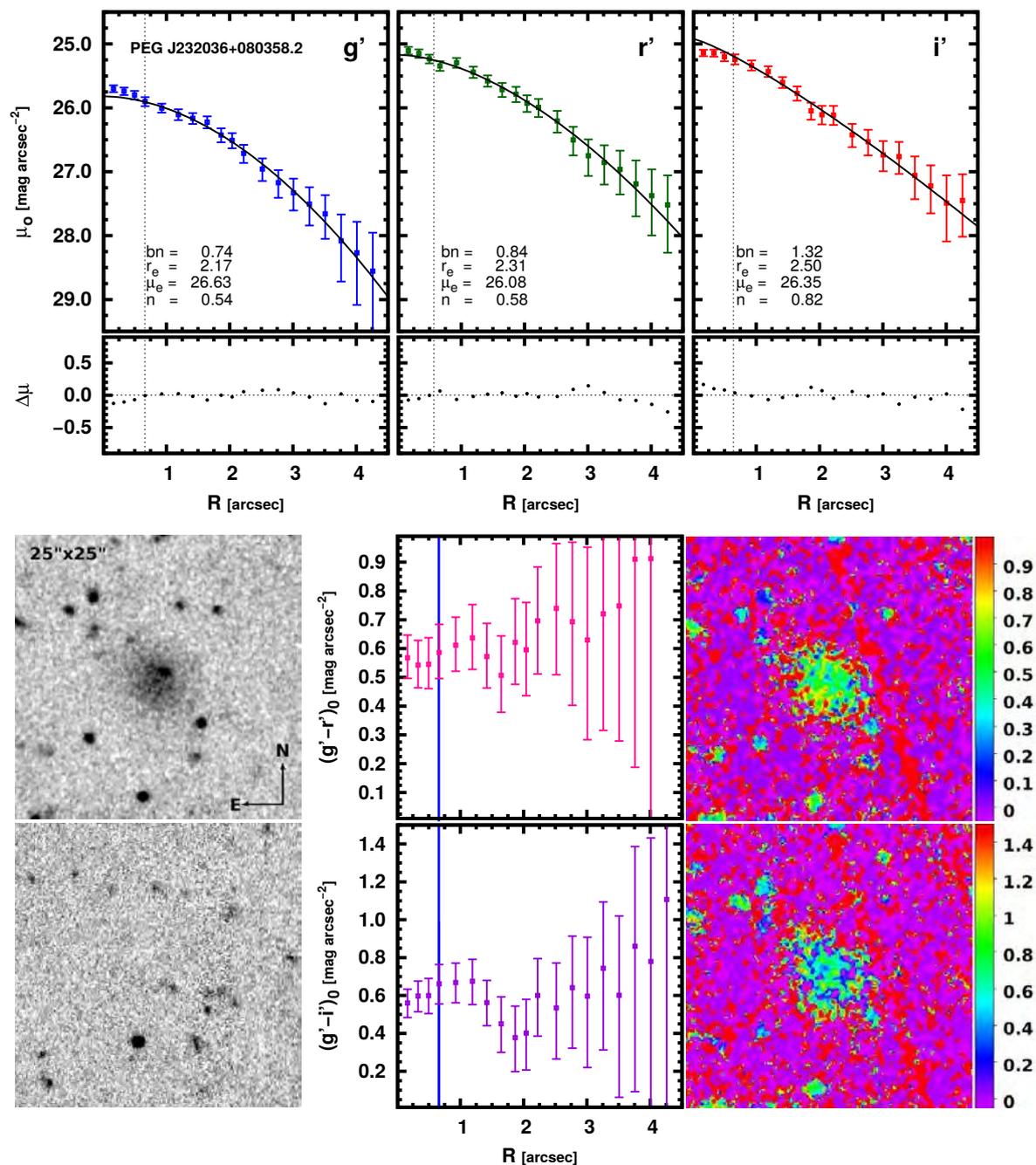
**Figura 3.7.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232049+080806.3. En este caso, el tamaño de la imagen es  $31 \times 31$  arcsec. Parece que hay un objeto o estructura extremadamente débil con bajo brillo superficial ( $\mu_{r'} \gtrsim 27$  mag arcsec $^{-2}$ ) al noroeste de la galaxia (flecha blanca). Posiblemente, esto podría ser evidencia de un origen de marea para este objeto. La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar. La estructura extremadamente débil señalada en la imagen Gemini-GMOS también se encuentra en ambos mapas de color (flecha negra). Se observa en torno a  $R \sim 6$  arcsec un pequeño *dip* en ambos perfiles de color que puede ser un efecto relacionado a dicha estructura.

### 3. Análisis y resultados



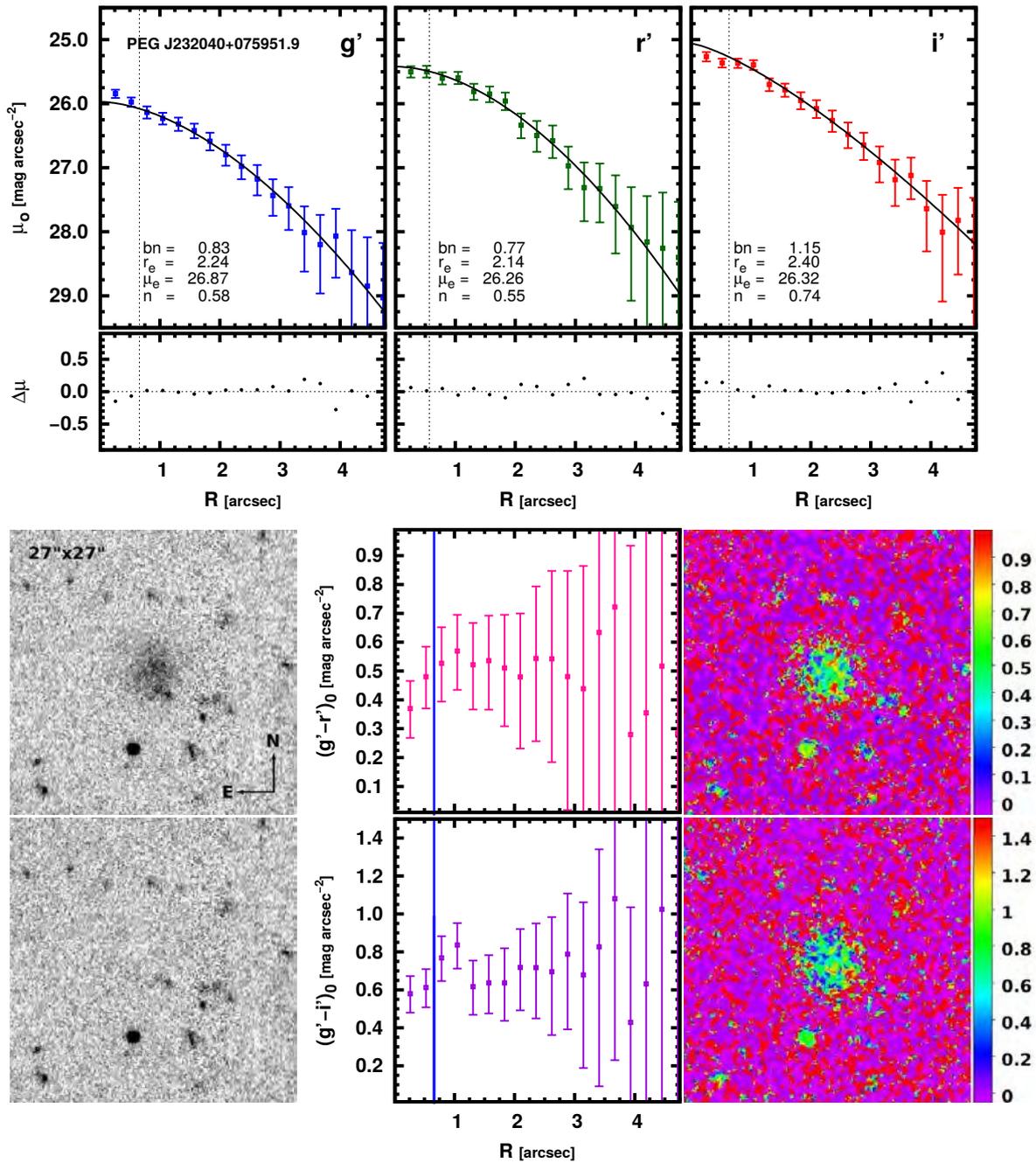
**Figura 3.8.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232054+080838.8. En este caso, el tamaño de la imagen es  $31 \times 31$  arcsec. Este objeto presenta un núcleo que se resuelve marginalmente en las imágenes de los tres filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ . La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar. El núcleo señalado en la imagen Gemini-GMOS no se nota en ninguno de los mapas de color. En cambio, los perfiles muestran un ligero gradiente hacia colores más azules en la región central.

### 3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color



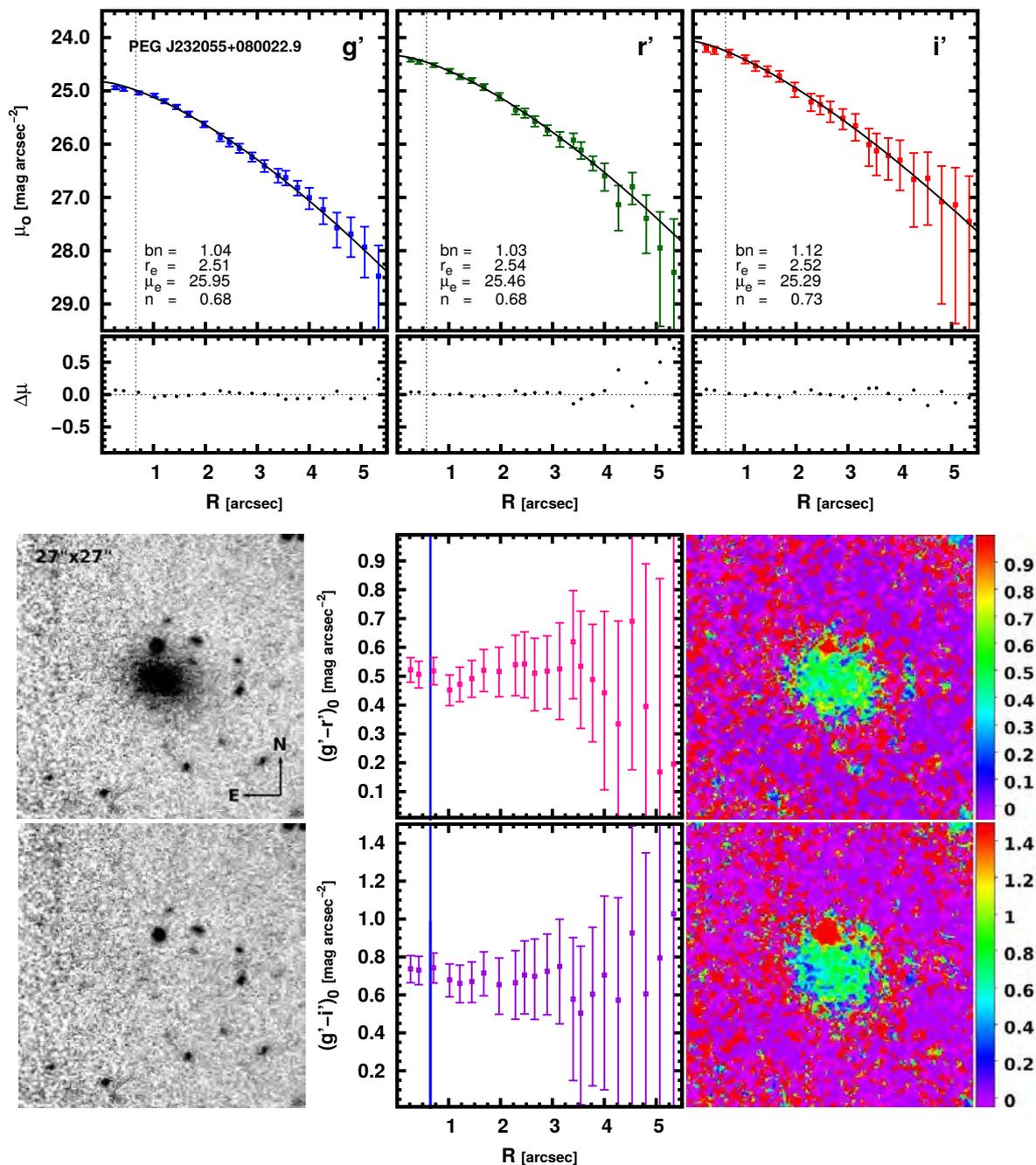
**Figura 3.9.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232036+080358.2. En este caso, el tamaño de la imagen es  $25 \times 25$  arcsec. La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar.

### 3. Análisis y resultados



**Figura 3.10.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232040+075951.9. En este caso, el tamaño de la imagen es  $27 \times 27$  arcsec. La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar.

### 3.1. Mapas de color y perfiles de brillo y color



**Figura 3.11.** Ídem Figura 3.1 pero para la galaxia LSB PEG J232055+080022.9. En este caso, el tamaño de la imagen es  $27 \times 27$  arcsec. La candidata muestra una morfología suave y regular sin evidencia de formación estelar.

## 3.2. Comparación de magnitudes y radios efectivos

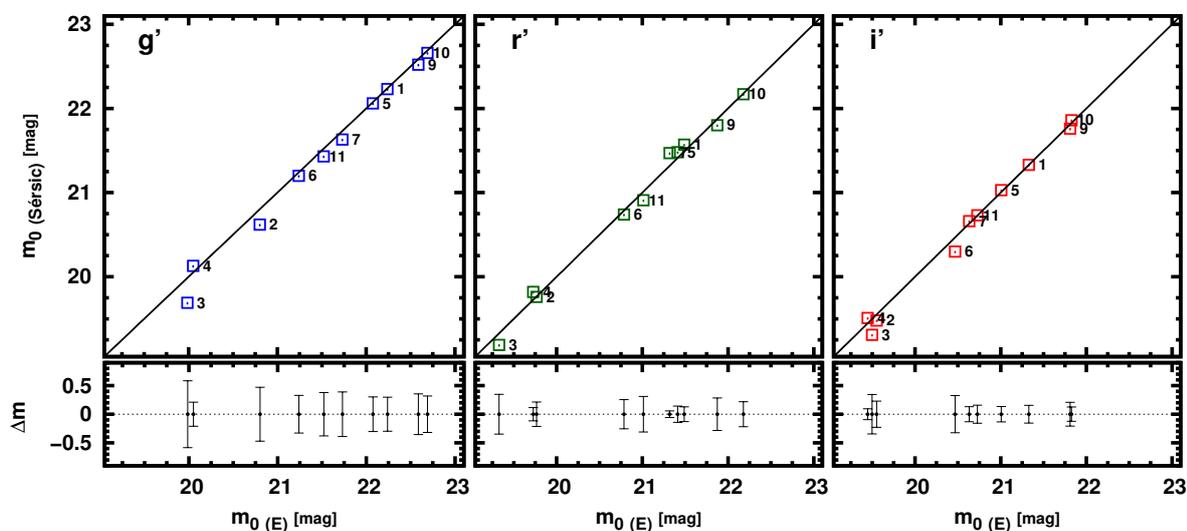
En esta Sección se comparan las magnitudes y los  $r_{\text{eff}}$  obtenidos directamente de los perfiles de brillo superficial observados (independientes del modelo) y los ajustados con la ley de Sérsic (dependientes del modelo). Esta comparación tiene sentido dado que los objetos de nuestro estudio muestran brillos superficiales extremadamente bajos. Por lo tanto, para caracterizar cada candidata a galaxia LSB se requiere obtener parámetros fotométricos y estructurales confiables.

En la Tabla 3.1 se presentan los parámetros fotométricos independientes del modelo obtenidos de los perfiles de brillo observados en los filtros  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$ . En este caso, las magnitudes totales, como fue explicado en la Sección 2.3.3, se obtienen mediante la integración numérica de estos perfiles hasta el radio equivalente total ( $r_{\text{tot}}$ ) de la galaxia. Se considera que  $r_{\text{tot}}$  es el radio equivalente en el que la curva de crecimiento se estabiliza en los tres filtros. Los errores correspondientes se calcularon a partir de la integración de los perfiles de brillo obtenidos después de sumar y restar el valor medio del nivel de cielo residual al perfil original, siguiendo el trabajo de Cellone (1999). Por otro lado, en la Tabla 3.2 se presentan los parámetros estructurales resultantes dependientes del modelo, así como los radios internos y externos considerados para realizar los ajustes en cada caso (columnas 4 y 5, respectivamente). Las magnitudes integradas totales fueron obtenidas integrando hasta el infinito los perfiles teóricos ajustados en cada caso (ver Sección 2.3.5).

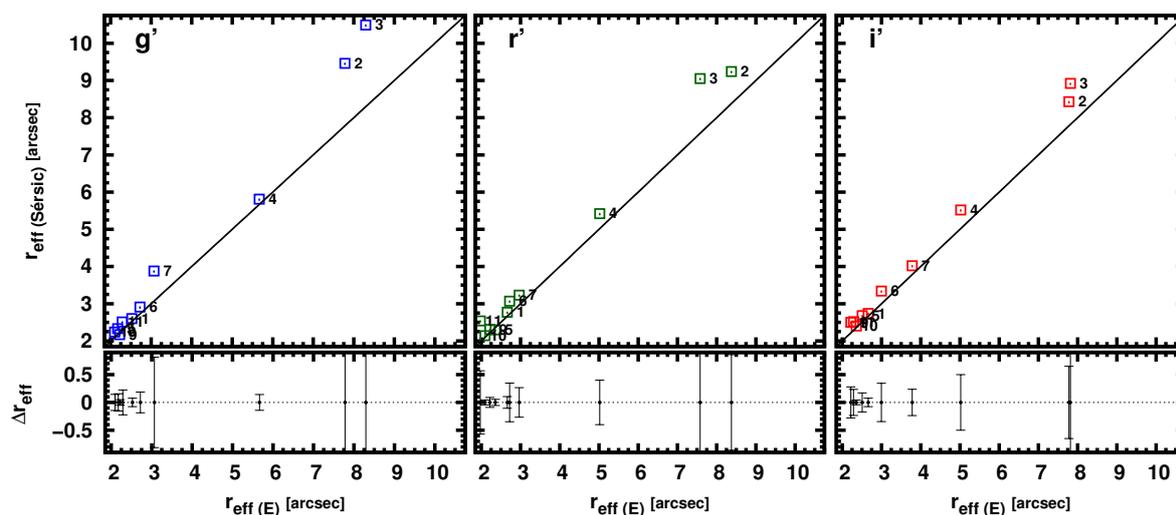
En las Tablas 3.1 y 3.2, es posible apreciar que las magnitudes y los  $r_{\text{eff}}$  obtenidos a partir del modelo de Sérsic muestran un buen acuerdo, dentro de los errores, con los valores independientes del modelo. A partir de ellas, se elaboró la Figura 3.12 que permite observar que, si bien se encuentra un buen acuerdo, las magnitudes independientes del modelo son más débiles. Esto es de esperar que sea así dado que en este caso las magnitudes se obtienen integrando los perfiles de brillo superficial observados hasta una isofota límite, mientras que las magnitudes obtenidas de los modelos se integran de los perfiles teóricos hasta el infinito. En esa misma dirección, la Figura 3.13 permite observar que los radios efectivos estimados a partir del modelo independiente son menores que los obtenidos del modelo dependiente, se espera que sea así dado que los radios que se obtienen del ajuste de Sérsic hasta el infinito. Por otro lado, los radios obtenidos del modelo pueden estar afectado por los errores en la estimación de cielo conduciendo a una subestimación del flujo total integrado considerado para el cálculo de los mismos.

La candidata PEG J232054+080838.8 no fue incluida en esta comparación debido a que no se pudo realizar el ajuste del perfil con un solo modelo de Sérsic (ver Sección 2.3.5). Cabe señalar que las candidatas PEG J232023+081331.4 y PEG J232024+081209.0 (etiquetas 2 y 3 en las figuras, respectivamente), presentan las mayores diferencias entre las cantidades medidas por ambos métodos, siendo estas galaxias LSB las que muestran brillos superficiales centrales más débiles, presentando así barras de error más grandes.

### 3.2. Comparación de magnitudes y radios efectivos



**Figura 3.12.** En los paneles superiores, se muestran los gráficos de comparación entre las magnitudes obtenidas directamente de los perfiles de brillo observados y el ajuste de Sérsic en los tres filtros. En los paneles inferiores, se muestran barras de error que representan la diferencia entre ambas mediciones. Las magnitudes están corregidas por extinción y enrojecimiento interestelar.



**Figura 3.13.** En los paneles superiores, se muestran los gráficos de comparación entre los  $r_{\text{eff}}$  obtenidos directamente de los perfiles de brillo observados y el ajuste de Sérsic en los tres filtros. En los paneles inferiores, se muestran las barras de error que es la diferencia entre ambas mediciones.

### 3. Análisis y resultados

(1)	Objeto (2)	R.A. (J2000) (3)	DEC (J2000) (4)	Filtro (5)	$r_{\text{tot}}$ (arcsec) (6)	$r_{\text{eff}}$ (arcsec) (7)	$m_{\text{ag}}$ (mag) (8)	$(g'-r')$ (mag) (9)	$(\mu_{\text{eff}})$ (mag arcsec <sup>-2</sup> ) (10)
1	PEG J231956+081253.7	23:19:56	08:12:53.7	$g'$	7.15	2.52 <sup>+0.28</sup> 0.28	22.53 <sup>+0.20</sup> 0.28	0.83 <sup>+0.26</sup> -0.31	26.53 <sup>+0.30</sup> -0.39
				$r'$		2.66 <sup>+0.14</sup> -0.14	21.69 <sup>+0.16</sup> -0.15		25.82 <sup>+0.19</sup> -0.19
				$i'$		2.66 <sup>+0.42</sup> -0.42	21.48 <sup>+0.33</sup> -0.29		25.60 <sup>+0.44</sup> -0.50
2	PEG J232023+081331.4	23:20:23	08:13:31.4	$g'$	19.15	7.78 <sup>+4.79</sup> -2.39	21.09 <sup>+0.92</sup> -0.65		27.54 <sup>+1.27</sup> -1.22
				$r'$		8.38 <sup>+2.39</sup> -1.80	19.97 <sup>+0.71</sup> -0.47	1.11 <sup>+1.17</sup> -0.80	26.58 <sup>+0.86</sup> -0.77
				$i'$		7.78 <sup>+2.99</sup> -1.19	19.70 <sup>+0.63</sup> -0.50		26.16 <sup>+0.88</sup> -0.65
3	PEG J232024+081209.0	23:20:24	08:12:09.0	$g'$	16.35	8.30 <sup>+1.18</sup> -0.71	20.27 <sup>+0.45</sup> -0.34		26.86 <sup>+0.52</sup> -0.39
				$r'$		7.58 <sup>+2.13</sup> -1.18	19.53 <sup>+0.62</sup> -0.44	0.74 <sup>+0.77</sup> -0.55	25.93 <sup>+0.79</sup> -0.60
				$i'$		7.82 <sup>+1.89</sup> -0.95	19.66 <sup>+0.61</sup> -0.44		26.12 <sup>+0.75</sup> -0.53
4	PEG J232037+081336.6	23:20:37	08:13:36.6	$g'$	7.17	2.17 <sup>+0.24</sup> -0.33	22.36 <sup>+0.21</sup> -0.27		26.04 <sup>+0.30</sup> -0.48
				$r'$		2.35 <sup>+0.18</sup> -0.15	21.62 <sup>+0.12</sup> -0.15	0.74 <sup>+0.24</sup> -0.30	25.47 <sup>+0.20</sup> -0.21
				$i'$		2.50 <sup>+0.43</sup> -0.52	21.16 <sup>+0.37</sup> -0.33		25.16 <sup>+0.49</sup> -0.68
5	PEG J232037+080934.3	23:20:37	08:09:34.3	$g'$	16.94	5.67 <sup>+1.54</sup> -1.16	20.34 <sup>+0.44</sup> -0.35		26.10 <sup>+0.64</sup> -0.67
				$r'$		5.02 <sup>+1.20</sup> -1.28	19.93 <sup>+0.40</sup> -0.35	0.40 <sup>+0.60</sup> -0.50	25.43 <sup>+0.59</sup> -0.85
				$i'$		5.02 <sup>+0.89</sup> -1.28	19.60 <sup>+0.35</sup> -0.31		25.10 <sup>+0.48</sup> -0.83
6	PEG J232038+081046.9	23:20:38	08:10:46.9	$g'$	9.26	2.72 <sup>+0.77</sup> -0.82	21.53 <sup>+0.38</sup> -0.33		25.70 <sup>+0.59</sup> -1.05
				$r'$		2.72 <sup>+1.06</sup> -1.09	20.99 <sup>+0.33</sup> -0.40	0.53 <sup>+0.47</sup> -0.52	25.16 <sup>+0.71</sup> -1.79
				$i'$		2.99 <sup>+1.33</sup> -1.09	20.62 <sup>+0.40</sup> -0.45		25.00 <sup>+0.80</sup> -1.48
7	PEG J232049+080806.2	23:20:49	08:08:06.2	$g'$	9.71	3.07 <sup>+0.92</sup> -0.92	22.02 <sup>+0.40</sup> -0.33		26.45 <sup>+0.65</sup> -1.05
				$r'$		2.96 <sup>+1.43</sup> -1.43	21.53 <sup>+0.61</sup> -0.50	0.49 <sup>+0.73</sup> -0.60	25.88 <sup>+0.96</sup> -3.69
				$i'$		3.78 <sup>+1.43</sup> -1.02	20.80 <sup>+0.48</sup> -0.36		25.67 <sup>+0.78</sup> -0.91

Continúa en la próxima página

(1)	Objeto (2)	R.A. (J2000) (3)	DEC (J2000) (4)	Filtro (5)	$r_{\text{tot}}$ (arcsec) (6)	$r_{\text{eff}}$ (arcsec) (7)	$mag$ (mag) (8)	$(g' - r')$ (mag) (9)	$\langle \mu_{\text{eff}} \rangle$ (mag arcsec $^{-2}$ ) (10)
8	PEG J232054+080838.8	23:20:54	08:08:38.8	$g'$	10.93	3.99 $^{+1.99}_{-1.06}$	21.69 $^{+0.58}_{-0.53}$	0.59 $^{+0.74}_{-0.66}$	26.70 $^{+0.95}_{-0.98}$
				$r'$		3.99 $^{+1.33}_{-0.80}$	21.10 $^{+0.46}_{-0.40}$		26.11 $^{+0.72}_{-0.68}$
				$i'$		4.13 $^{+2.13}_{-1.06}$	20.70 $^{+0.67}_{-0.57}$		25.78 $^{+1.02}_{-0.97}$
9	PEG J232036+080358.2	23:20:36	08:03:58.2	$g'$	6	2.22 $^{+0.35}_{-0.00}$	22.87 $^{+0.26}_{-0.25}$		26.60 $^{+0.40}_{-0.25}$
				$r'$		2.22 $^{+0.35}_{-0.29}$	22.08 $^{+0.27}_{-0.25}$	0.79 $^{+0.37}_{-0.36}$	25.81 $^{+0.40}_{-0.42}$
				$i'$		2.22 $^{+0.55}_{-0.18}$	21.97 $^{+0.25}_{-0.22}$		25.70 $^{+0.29}_{-0.77}$
10	PEG J232040+075951.9	23:20:40	07:59:51.9	$g'$	6.5	2.09 $^{+0.52}_{-0.52}$	22.98 $^{+0.37}_{-0.35}$		26.58 $^{+0.57}_{-0.83}$
				$r'$		2.09 $^{+0.78}_{-0.52}$	22.39 $^{+0.34}_{-0.34}$	0.59 $^{+0.50}_{-0.49}$	25.99 $^{+0.69}_{-0.83}$
				$i'$		2.36 $^{+0.52}_{-0.26}$	21.98 $^{+0.32}_{-0.25}$		25.84 $^{+0.51}_{-0.37}$
11	PEG J232055+080022.9	23:20:55	08:00:22.9	$g'$	7	2.29 $^{+0.31}_{-0.17}$	21.80 $^{+0.14}_{-0.16}$		25.60 $^{+0.29}_{-0.24}$
				$r'$		1.97 $^{+0.49}_{-0.00}$	21.22 $^{+0.16}_{-0.18}$	0.59 $^{+0.21}_{-0.24}$	24.69 $^{+0.77}_{-0.16}$
				$i'$		2.29 $^{+0.60}_{-0.37}$	20.88 $^{+0.34}_{-0.35}$		24.68 $^{+0.58}_{-0.55}$

**Tabla 3.1.** Información fotométrica de los objetos de bajo brillo superficial presentados en este trabajo, obtenida del análisis de la curva de crecimiento. Magnitudes aparentes y colores no están corregidos por extinción. Las columnas representan los siguientes datos: (6)  $r_{\text{tot}}$  es el radio equivalente al cual la curva de crecimiento se estabiliza en los tres filtros. (7)  $r_{\text{eff}}$  es el radio equivalente que contiene la mitad del flujo dentro de  $r_{\text{tot}}$ . (8) Las magnitudes integradas se toman en  $r_{\text{tot}}$ . (9)  $(g' - r')$  los colores se toman en el radio total de las galaxias, ya que las curvas de crecimiento  $g'$  y  $r'$  se estabilizan en este radio. (10)  $\langle \mu_{\text{eff}} \rangle = \text{mag} + 2.5 \log(2\pi r_{\text{eff}}^2)$ . Cada galaxia fue numerada y ordenada en forma creciente según las coordenadas de ascensión recta.

### 3. Análisis y resultados

Objeto	Filtro	$r_{\text{int}}$ (arcsec)	$r_{\text{ext}}$ (arcsec)	$\mu_0$ (mag arcsec $^{-2}$ )	$\tau_0$ (arcsec)	N	$\mu_{\text{eff}}$ (mag arcsec $^{-2}$ )	$\tau_{\text{eff}}$ (arcsec)	$n$	$mag_{\text{tot}}$ (mag)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	PEG-J231956+081253.7	$g'$	0.8	25.90 ± 0.03	2.97 ± 0.05	1.80 ± 0.07	26.75	2.60	0.56	22.23	
		$r'$	0.7	25.44 ± 0.03	3.34 ± 0.07	1.97 ± 0.13	26.19	2.77	0.51	21.57	
		$i'$	0.8	25.17 ± 0.02	3.30 ± 0.05	1.95 ± 0.09	25.93	2.74	0.70	21.33	
2	PEG-J232023+081331.4	$g'$	0.8	26.82 ± 0.05	8.6 ± 0.35	1.36 ± 0.10	28.05	9.46	0.73	20.62	
		$r'$	0.8	26.18 ± 0.03	10.61 ± 0.24	1.81 ± 0.12	27.03	9.24	0.55	19.76	
		$i'$	0.9	25.73 ± 0.02	9.93 ± 0.17	1.88 ± 0.09	26.53	8.43	0.53	19.48	
3	PEG-J232024+081209.0	$g'$	0.9	26.27 ± 0.02	11.24 ± 0.16	1.63 ± 0.08	27.25	10.49	0.64	19.69	
		$r'$	1.0	25.51 ± 0.02	10.04 ± 0.16	1.69 ± 0.08	26.44	9.16	0.59	19.19	
		$i'$	0.7	25.64 ± 0.03	10.35 ± 0.27	1.74 ± 0.14	26.53	8.25	0.57	19.31	
4	PEG-J232037+081336.6	$g'$	1.0	25.28 ± 0.02	5.30 ± 0.09	1.37 ± 0.04	26.51	5.81	0.73	20.13	
		$r'$	0.8	25.08 ± 0.02	2.98 ± 0.03	2.26 ± 0.08	25.69	2.30	0.44	21.48	
		$i'$	0.9	24.65 ± 0.03	2.84 ± 0.06	1.62 ± 0.09	25.63	2.68	0.62	21.03	
5	PEG-J232037+080934.3	$g'$	0.8	24.95 ± 0.05	2.77 ± 0.10	1.43 ± 0.07	26.11	2.91	0.70	21.20	
		$r'$	0.9	24.80 ± 0.02	4.93 ± 0.10	1.36 ± 0.04	26.04	5.42	0.73	19.82	
		$i'$	0.9	24.51 ± 0.02	4.89 ± 0.10	1.33 ± 0.04	25.79	5.52	0.75	19.51	
6	PEG-J232038+081046.9	$g'$	0.8	25.55 ± 0.03	2.78 ± 0.05	1.92 ± 0.09	26.32	2.33	0.52	22.06	
		$r'$	0.8	24.42 ± 0.04	2.53 ± 0.08	1.25 ± 0.05	25.80	3.07	0.80	20.74	
		$i'$	0.9	24.13 ± 0.06	2.58 ± 0.13	1.19 ± 0.07	25.60	3.34	0.84	20.30	
7	PEG-J232049+080806.2	$g'$	0.6	25.96 ± 0.03	3.59 ± 0.11	1.26 ± 0.07	27.32	4.30	0.79	21.63	
		$r'$	0.6	25.50 ± 0.03	3.64 ± 0.09	1.52 ± 0.08	26.57	3.62	0.66	21.47	
		$i'$	0.5	24.94 ± 0.03	3.35 ± 0.17	1.03 ± 0.07	26.69	5.36	0.97	20.66	
8	PEG-J232054+080838.8 (Inner)	$g'$	0.0	24.32 ± 0.01	0.45 ± 0.01	2.11 ± 0.11	24.99	0.36	0.47	24.83	
		$r'$	0.0	23.46 ± 0.01	0.44 ± 0.01	2.18 ± 0.10	24.10	0.34	0.46	24.07	
		$i'$	0.0	22.68 ± 0.01	0.33 ± 0.01	1.89 ± 0.06	23.48	0.28	0.53	23.82	
		$g'$	0.0	25.13 ± 0.01	1.86 ± 0.30	0.80 ± 0.08	27.48	4.88	1.25	21.24	
		$r'$	0.0	24.89 ± 0.01	2.48 ± 0.44	0.92 ± 0.13	26.89	5.74	1.08	20.37	
		$i'$	0.0	24.50 ± 0.02	2.14 ± 0.48	0.80 ± 0.12	26.87	5.67	1.29	20.30	
9	PEG-J232036+080358.2	$g'$	0.7	25.82 ± 0.03	2.55 ± 0.06	1.87 ± 0.11	26.63	2.17	0.54	22.52	
		$r'$	0.6	25.17 ± 0.05	2.56 ± 0.09	1.72 ± 0.14	26.08	2.31	0.58	21.80	
		$i'$	0.6	26.08 ± 0.11	2.31 ± 0.71	1.22 ± 0.13	26.35	2.50	0.82	21.76	
10	PEG-J232040+075951.9	$g'$	0.7	25.97 ± 0.04	2.50 ± 0.08	1.73 ± 0.11	26.87	2.24	0.58	22.66	
		$r'$	0.6	25.42 ± 0.06	2.47 ± 0.11	1.82 ± 0.17	26.26	2.14	0.55	22.17	
		$i'$	0.6	25.06 ± 0.09	2.16 ± 0.16	1.35 ± 0.14	26.32	2.40	0.74	21.86	
11	PEG-J232055+080022.9	$g'$	0.7	24.83 ± 0.04	2.45 ± 0.07	1.47 ± 0.17	25.95	2.51	0.68	21.43	
		$r'$	0.6	24.34 ± 0.04	2.48 ± 0.07	1.47 ± 0.08	25.46	2.54	0.68	20.91	
		$i'$	0.6	24.07 ± 0.04	2.32 ± 0.07	1.38 ± 0.07	25.29	2.52	0.73	20.73	

**Tabla 3.2.** Parámetros estructurales de las candidatas a galaxias LSB en Pegasus I, obtenidos a partir del ajuste de la ley Sérsic a sus perfiles de brillo superficial.  $r_{\text{int}}$  y  $r_{\text{ext}}$  denotan los radios internos y externos considerados para realizar los ajustes. En el caso del objeto PEG-J232054+080838.8, que muestra dos componentes en su perfil de brillo, se ajustó una combinación de dos funciones de Sérsic a todo el perfil. Cada galaxia fue numerada y ordenada en forma creciente según las coordenadas de ascensión recta.

### 3.3. Diagramas Fotométricos

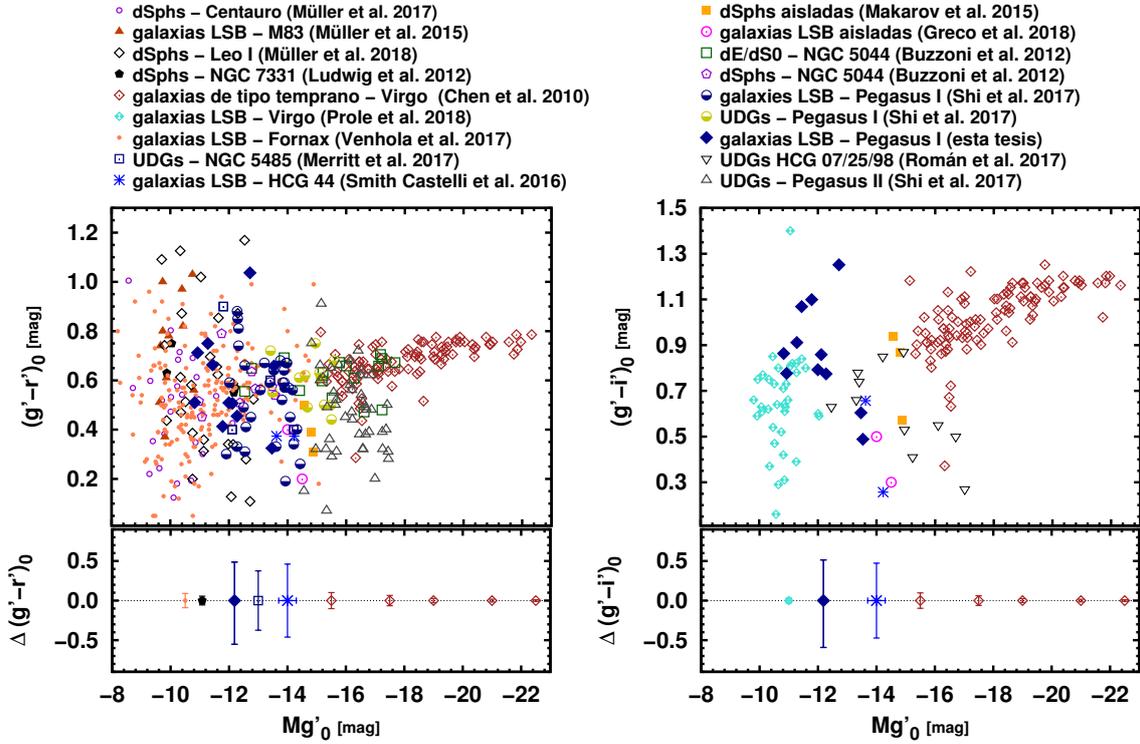
A través de una cuidadosa búsqueda visual en las imágenes  $g'$ ,  $r'$  e  $i'$  de los nueve campos Gemini-GMOS, se han descubierto once nuevas candidatas a galaxias LSB de tipo temprano que no han sido catalogadas anteriormente en el grupo de Pegasus I. La selección preliminar se ha realizado teniendo en cuenta que las nuevas candidatas se ubican dentro del régimen de bajo brillo superficial y corresponden principalmente a morfologías similares a las LSB de tipo temprano. En estos casos de galaxias débiles, la probabilidad de que pertenezcan al “background” es mayor que para las más brillantes. Dado que no se cuenta con datos espectroscópicos de ellas, no se puede establecer la pertenencia al grupo de Pegasus I. Por tal motivo, es necesario imponer alguna restricción para garantizar la mayor probabilidad de ser galaxias LSB miembro de tipo temprano.

De acuerdo con el trabajo realizado por [Smith Castelli et al. \(2013\)](#), existe una conexión entre las zonas identificadas para las galaxias de tipo temprano del cúmulo de Virgo en el diagrama color-magnitud (DCM) con las observadas en  $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$ -luminosidad. Dicha conexión permite detectar candidatas a galaxias LSB a partir del análisis de ambos diagramas. En consecuencia, resulta razonable analizar qué candidatas a galaxias LSB identificadas en Pegasus I presentan similitudes con las galaxias pertenecientes a distintos grupos o cúmulos en los DCM y  $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$ -luminosidad.

#### 3.3.1. Diagrama color-magnitud

Es interesante comparar las propiedades fotométricas de las galaxias LSB detectadas en la dirección de Pegasus I con las de objetos similares identificados en otros entornos. Con este objetivo, en la Figura 3.14 se presentan dos diagramas de color-magnitud que muestran la ubicación de las galaxias dSphs, LSBs y las UDGs reportadas en la literatura, junto con las galaxias LSB analizadas en esta tesis, suponiendo que estas últimas están a la distancia de Pegasus I. Se considera el módulo de distancia de Pegasus I como el obtenido de la distancia media de las dos galaxias dominantes, NGC 7619 y NGC 7626 (Tabla 1.2;  $\langle D \rangle = 50.8$  Mpc,  $(m - M) = 33.52$  mag,  $1$  arco seg =  $0.248$  kpc). Como referencia, también se muestra la secuencia roja definida por una submuestra de galaxias de tipo temprano en la región central del cúmulo de Virgo ([Chen et al. 2010](#)) y una muestra de galaxias dE/dS0 en el grupo NGC 5044 ([Buzzoni et al. 2012](#)).

Se puede apreciar en estos gráficos que, en general, las galaxias LSB parecen mostrar un rango de colores mucho más amplio que las galaxias típicas de tipo temprano. En el caso particular de los objetos LSB identificados en Pegasus I, con la excepción de un caso, tienden a seguir la secuencia roja de galaxias de tipo temprano o mostrar colores más rojos. Sorprendentemente, las galaxias LSB más rojas de las muestras consideradas se encuentran en entornos relativamente ricos, como M 83, Leo I y Pegasus I, mientras que sus colores son mucho más azules que los esperados para el cirrus de la Vía Láctea ( $(g' - r') = 1.33$ -  $2.03$ ; [Ludwig et al. 2012](#)). Por el contrario, las galaxias LSB que se encuentran en forma aislada o dentro de los grupos compactos de Hickson siguen la secuencia roja de las galaxias de tipo temprano o muestran colores más azules. Las galaxias LSB reportadas en el cúmulo de Virgo, con la excepción de un solo objeto, también se comportan de la misma manera.



**Figura 3.14.** Diagramas color-magnitud que muestran la ubicación de las galaxias LSB presentadas en este trabajo, suponiendo que están a la distancia media entre NGC 7619 y NGC 7626 (diamantes rellenos de color azul). Como referencia, trazamos la secuencia roja definida por una submuestra de galaxias de tipo temprano en la región central del cúmulo de Virgo (diamantes abiertos de color bordó; Chen et al. 2010), y una muestra de galaxias dE/dS0 en el grupo NGC 5044 (cuadrados abiertos sin punto de color verde; Buzzoni et al. 2012). También incluimos diferentes muestras de LSB, galaxias esferoidales (dSphs) y galaxias ultra-difusas (UDGs) reportadas en la literatura. Se enumeran en el margen superior del panel según sus distancias o las del entorno donde se detectaron, en orden ascendente de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. Estas galaxias son: *dSphs - Centauro* (Müller et al. 2017), *galaxias LSB - M83* (Müller et al. 2015), *dSphs - Leo I* (Müller et al. 2018), *dSphs - NGC 7331* (Ludwig et al. 2012), *galaxias LSB - Virgo* (Mihos et al. 2015; Prole et al. 2018), *galaxias LSB - Fornax* (Venhola et al. 2017), *UDGs - NGC 5485* (Merritt et al. 2016), *galaxias LSB - HCG 44* (Smith Castelli et al. 2016), *dSphs aisladas* (Makarov et al. 2015), *galaxias LSB aisladas* (Greco et al. 2018), *dSphs - NGC 5044* (Buzzoni et al. 2012), *LSB/UDGs - Pegasus I* (Shi et al. 2017), *UDGs - HCG 07, HCG 25 y HCG 98* (Román & Trujillo 2017b) y *UDGs - Pegasus II* (Shi et al. 2017). En ambos diagramas, las barras de error son el promedio de los errores en los colores de cada muestra, cuando están disponibles, y se muestran en los paneles inferiores.

### 3.3.2. Diagrama $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$ -luminosidad

En la Figura 3.15 se presenta el diagrama de  $\langle\mu_{\text{eff}}\rangle$ -luminosidad de diferentes muestras de galaxias LSB reportadas en la literatura. Como referencia, se muestra la ubicación de submuestras de galaxias de tipo temprano en el cúmulo de Virgo (Smith Castelli et al. 2013) y el grupo NGC 5044 (Buzzoni et al. 2012). En este tipo de gráficos, galaxias con el mismo radio efectivo real se ubican sobre una recta. Esto surge de la definición de brillo superficial efectivo promedio:

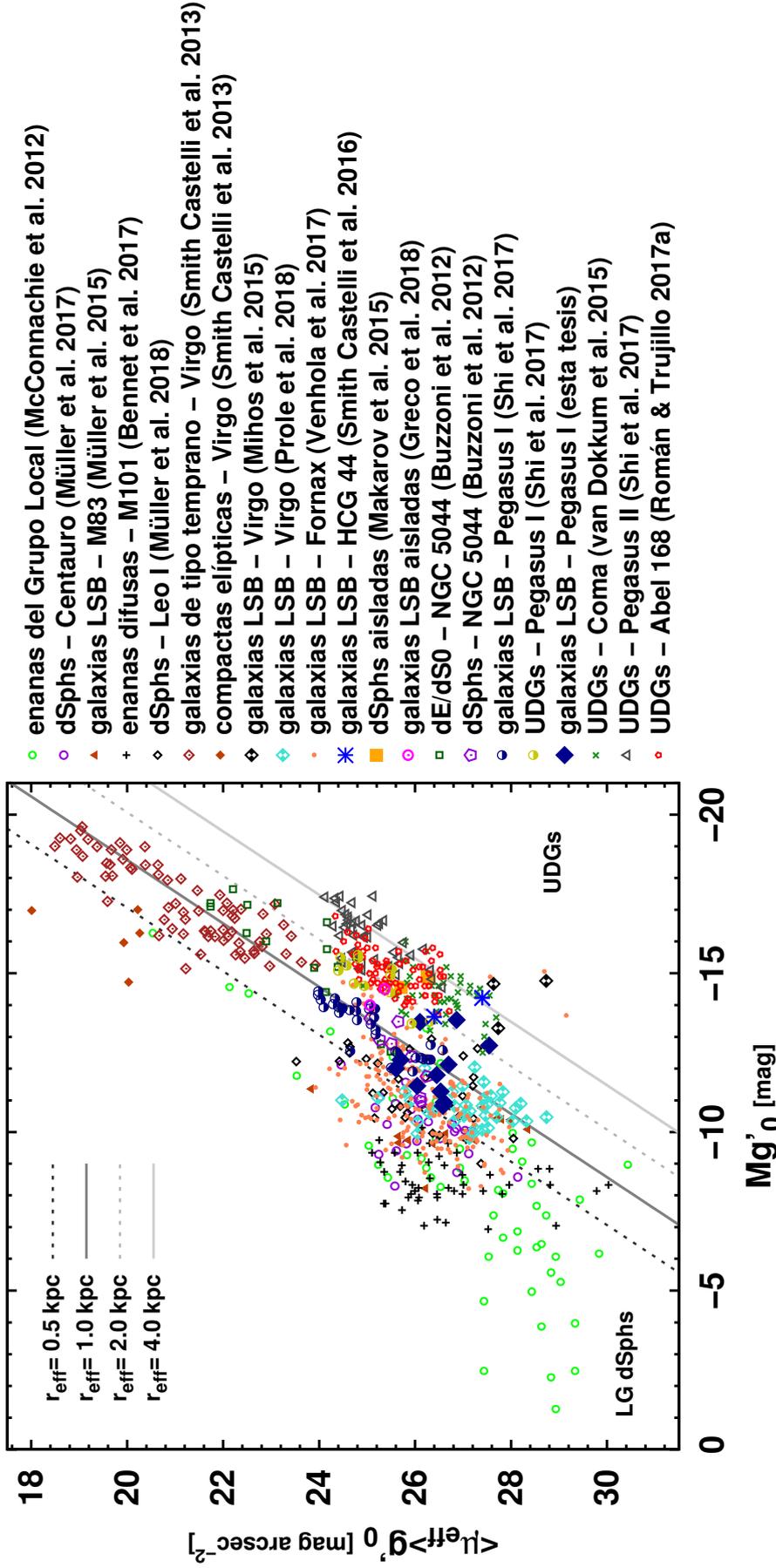
$$\langle\mu_{\text{eff}}\rangle = M - 5 + 2.5 \log(2\pi) + 5 \log(r_{\text{eff}}), \quad (3.1)$$

donde  $r_{\text{eff}}$  es el radio efectivo en parsecs.

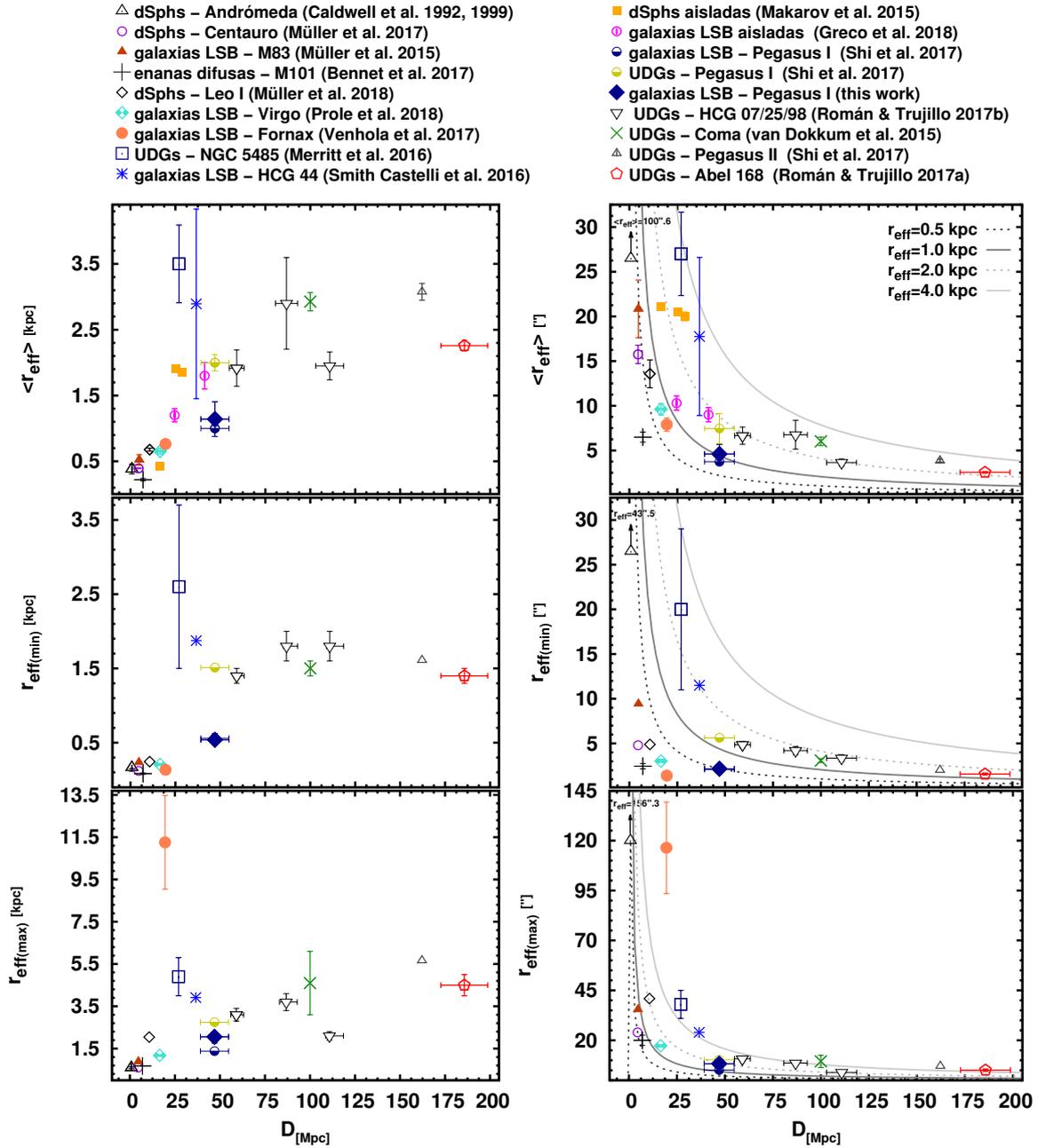
Este gráfico muestra que las galaxias típicas de tipo temprano de diferentes luminosidades tienden a colocarse alrededor del lugar de constante  $r_{\text{eff}} = 1$  kpc con una baja dispersión, independientemente de su entorno, como ya se informó (por ejemplo, Smith Castelli et al. 2012, 2013, y referencias allí citadas). Por el contrario, las galaxias LSB tienden a mostrar un rango más amplio en  $r_{\text{eff}}$ , pasando de las galaxias dSph pertenecientes al Grupo Local (LG) (las galaxias LSB más pequeñas detectadas hasta ahora) a las llamadas UDGs en grupos y cúmulos más distantes (que son los ejemplos más grandes de galaxias LSB). En particular, las galaxias LSB detectadas en Pegasus I parecen mostrar  $r_{\text{eff}}$  similares a las de las galaxias de tipo temprano, llenando el *gap* entre los sistemas LSB más pequeños y más grandes.

En este gráfico, las referencias a las diferentes muestras se ordenan de acuerdo con sus distancias reportadas (o las de los entornos hacia los que se detectaron), aumentando de arriba hacia abajo. Una tendencia del tamaño con la distancia es evidente; es decir, los objetos más pequeños se identifican en el Grupo Local, mientras que los sistemas más grandes reportados en la literatura se detectan en grupos/cúmulos más distantes.

Para cuantificar esta apreciación, la Figura 3.16 muestra los  $r_{\text{eff}}$  medio, mínimo y máximo (absolutos y aparentes) de diferentes muestras. Todos los paneles muestran la misma tendencia: mientras que los objetos más grandes se encuentran en los entornos más distantes, los más pequeños solo se detectan en el volumen local.



**Figura 3.15.** Diagrama ( $\mu_{\text{eff}}$ )-luminosidad de las galaxias de tipo temprano en la región central del cúmulo de Virgo (Smith Castelli et al. 2013), mostrando la ubicación de las galaxias LSB presentadas en este trabajo, suponiendo que están a la distancia media entre NGC 7619 y NGC 7626. Para comparar, también incluimos diferentes muestras de LSB, galaxias esferoidales (dSphs) y galaxias ultra-difusas (UDGs) reportadas en la literatura. Se enumeran en el margen derecho del panel según sus distancias o las del entorno donde se detectaron, en orden ascendente de arriba hacia abajo. Estas galaxias son: *enanas del Grupo Local* (McConnachie 2012), *dSphs - Centauro* (Müller et al. 2017), *galaxias LSB - M83* (Müller et al. 2015), *enanas difusas - M101* (Bennet et al. 2017), *dSphs - Leo I* (Müller et al. 2018), *galaxias LSB - Fornax* (Venhola et al. 2017), *galaxias LSB - Virgo* (Mihos et al. 2015; Prole et al. 2018), *galaxias LSB - HCG 44* (Smith Castelli et al. 2016), *dSphs aisladas* (Makarov et al. 2015), *galaxias LSB aisladas* (Greco et al. 2018), *galaxias dE/dS0 y dSphs - NGC 5044* (Buzzoni et al. 2012), *galaxias LSB/UDGs - Pegasus I* (Shi et al. 2017), *UDGs - Coma* (van Dokkum et al. 2015), *UDGs - Pegasus II* (Shi et al. 2017) y *UDGs - Abel 168* (Román & Trujillo 2017a).

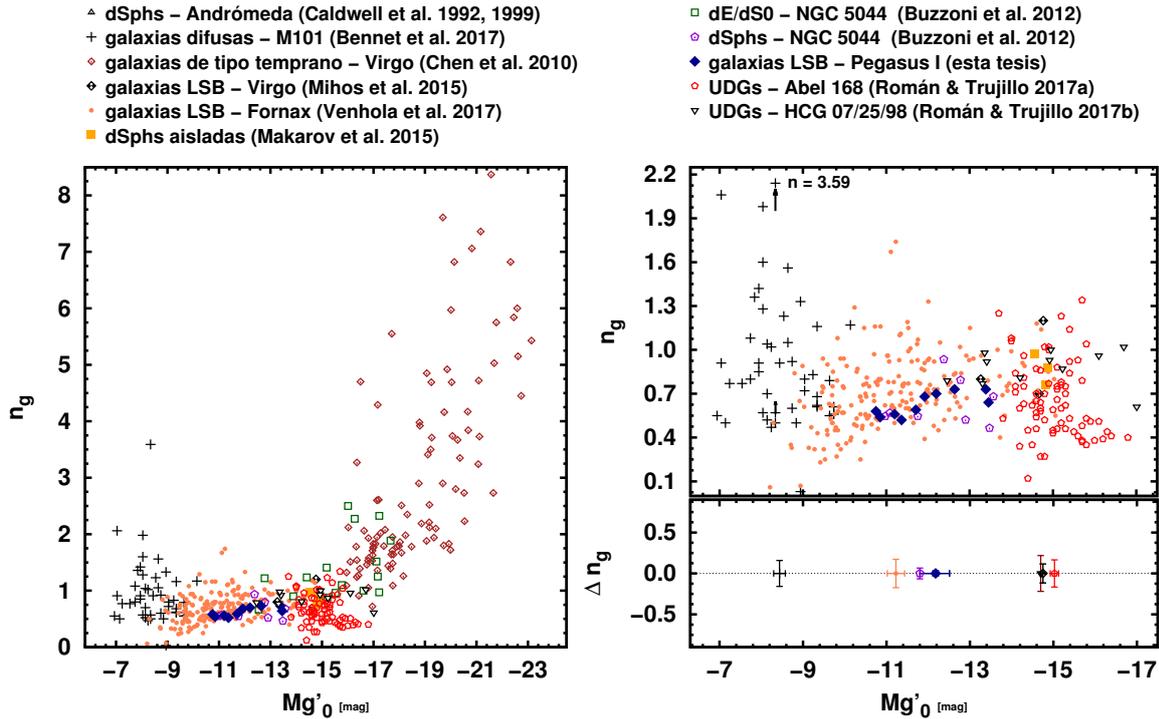


**Figura 3.16.** Radio efectivo medio (arriba), mínimo (centro) y máximo (abajo) de varias muestras de galaxias LSB detectadas hacia diferentes grupos y cúmulos de galaxias, frente a las distancias a los grupos/cúmulos. En los paneles izquierdos, el radio efectivo se da en kpcs, suponiendo que los objetos están a la distancia de los grupos/cúmulos hacia donde fueron detectados. En los paneles derechos, el radio efectivo se da en *arcsec*. En los paneles izquierdos, parece ser una tendencia en el sentido de que en los grupos/cúmulos más cercanos no se detectan grandes galaxias LSB, mientras que las pequeñas galaxias LSB se pierden en entornos más distantes.

#### 3.3.3. Relaciones del índice de Sérsic

En la Figura 3.17 se presenta la relación entre el índice de Sérsic  $n$  contra la magnitud absoluta en el filtro  $g'$ , donde vemos que existe una relación entre  $n$  y  $M_{g'}$ . Dicha relación está de acuerdo con lo encontrado por distintos autores, entre ellos los trabajos de Cellone et al. (1994) y Buzzoni et al. (2012) que establecen que el índice de Sérsic debe ser  $n \lesssim 1$  para galaxias LSB.

En la figura 3.17 se puede observar que las galaxias LSB muestran índices de Sérsic en un rango reducido en comparación con las galaxias de tipo temprano. En particular, para las muestras que se presentan en esa figura, las galaxias LSB tendrían  $n < 2$ . En el caso particular de los objetos detectados en la dirección de Pegasus I, hemos obtenido que, con excepción de una galaxia, presentan perfiles de brillo que pueden ser ajustados con un solo modelo de Sérsic con  $0.44 < n < 0.97$ . La galaxia restante presentó dos componentes: un núcleo con  $(g' - i') = 1.01$ , marginalmente resuelto en la imagen  $i'$ , y una componente externa con  $1.08 < n < 1.26$  dependiendo del filtro (ver Tabla 3.2). El ajuste de estas componentes se realizó considerando el modelo básico de dos funciones de Sérsic. Dicho ajuste se realizó dos veces, con el índice de Sérsic que representa la componente externa fijo en  $n = 1$  y  $n$  libre. Se encontró que el ajuste que se corresponde con el menor valor de chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) es para  $n$  libre. Por lo tanto, usamos los resultados con  $n$  libre. Cabe destacar que la componente externa se encuentra dentro del rango de los índices de Sérsic esperado para las galaxias LSB (por ejemplo Mihos et al. 2015; Venhola et al. 2017). Es interesante ver que a pesar de que se han identificado algunas galaxias LSB con núcleo, pertenecientes a grupos cercanos como M 101 (Bennet et al. 2017) y Leo-I (Müller et al. 2018), esta propiedad no ha sido incluida en los modelos de formación actuales para este tipo de galaxias ni se han estudiado en mayor detalle las dos componentes que presentan este tipo de galaxias nucleadas.



**Figura 3.17.** Relación entre el índice de Sérsic  $n$  contra la magnitud absoluta en el filtro  $g'$  para nuestras candidatas LSB (rombos azules) adoptando que están a la distancia media entre NGC 7619 y NGC 7626. Incluimos diferentes muestras de galaxias de tipo temprano reportadas en los trabajos de [Chen et al. \(2010\)](#) y [Buzzoni et al. \(2012\)](#). Panel izquierdo: mostramos la ubicación de diferentes muestras de galaxias LSB y una submuestra de galaxias tempranas de Virgo (pequeños diamantes bordó con un punto) y NGC 5044 (pequeños cuadrados verdes abiertos). Se puede ver que las galaxias LSB muestran un rango muy estrecho de valores de  $n$  en comparación con los que muestran las galaxias típicas de tipo temprano. Panel derecho: Aquí solo mostramos las muestras de galaxias LSB para presentar en detalle los valores del índice de Sérsic que muestran estos objetos. En ambos paneles, el código del símbolo es el mismo que en la [Figura 3.15](#).

### 3.4. Distribución Espacial

La [Figura 3.18](#) muestra la distribución espacial proyectada de las candidatas a galaxias LSB analizadas en este trabajo. En ella, cada círculo rojo representa una candidata a galaxia LSB de la muestra analizada. Como se ha mencionado anteriormente, el grupo Pegasus I consiste de dos subestructuras centradas en las dos galaxias elípticas NGC 7619 y NGC 7626, las cuales se señalan en dicha figura. En ella, se puede apreciar que las candidatas a galaxias LSB no muestran una distribución homogénea en los campos observados. Si bien dichos campos no mapean en forma simétrica la región central de Pegasus I, resulta evidente que las candidatas a galaxias LSB que hemos identificado en ellos presentan una distribución elongada en dirección *NO-SE*. En particular, debe destacarse que los objetos clasificados en esta tesis como UDGs, los cuales representan aproximadamente el 30 % de la muestra de LSBs presentada, se distribuyen exclusivamente en dirección *EO* en torno a las galaxias dominantes, como se puede apreciar en la [Figura 3.19](#).

Con el fin de profundizar el análisis de este resultado, en el panel izquierdo de la

### 3. Análisis y resultados

---

Figura 3.19 se muestran las posiciones de las galaxias LSB y UDGs reportadas por Shi et al. (2017) en Pegasus I junto con las detectadas en este trabajo, todas ellas codificadas en cuanto a sus colores  $(g' - r')_0$ . En esta Figura se puede observar que la distribución de las galaxias de Shi et al. (2017) muestran una distribución elongada, pero esta vez en la dirección *NE-SO*, esto es, perpendicular a la que parecieran mostrar nuestras galaxias. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las observaciones de Shi et al. (2017) no abarcan la región *SE*, ahora en blanco, del diagrama, y que el límite hacia el *NO* del diagrama, también en blanco, correspondería a la región del grupo Pegasus II (ver figura 4 en Shi et al. 2017).

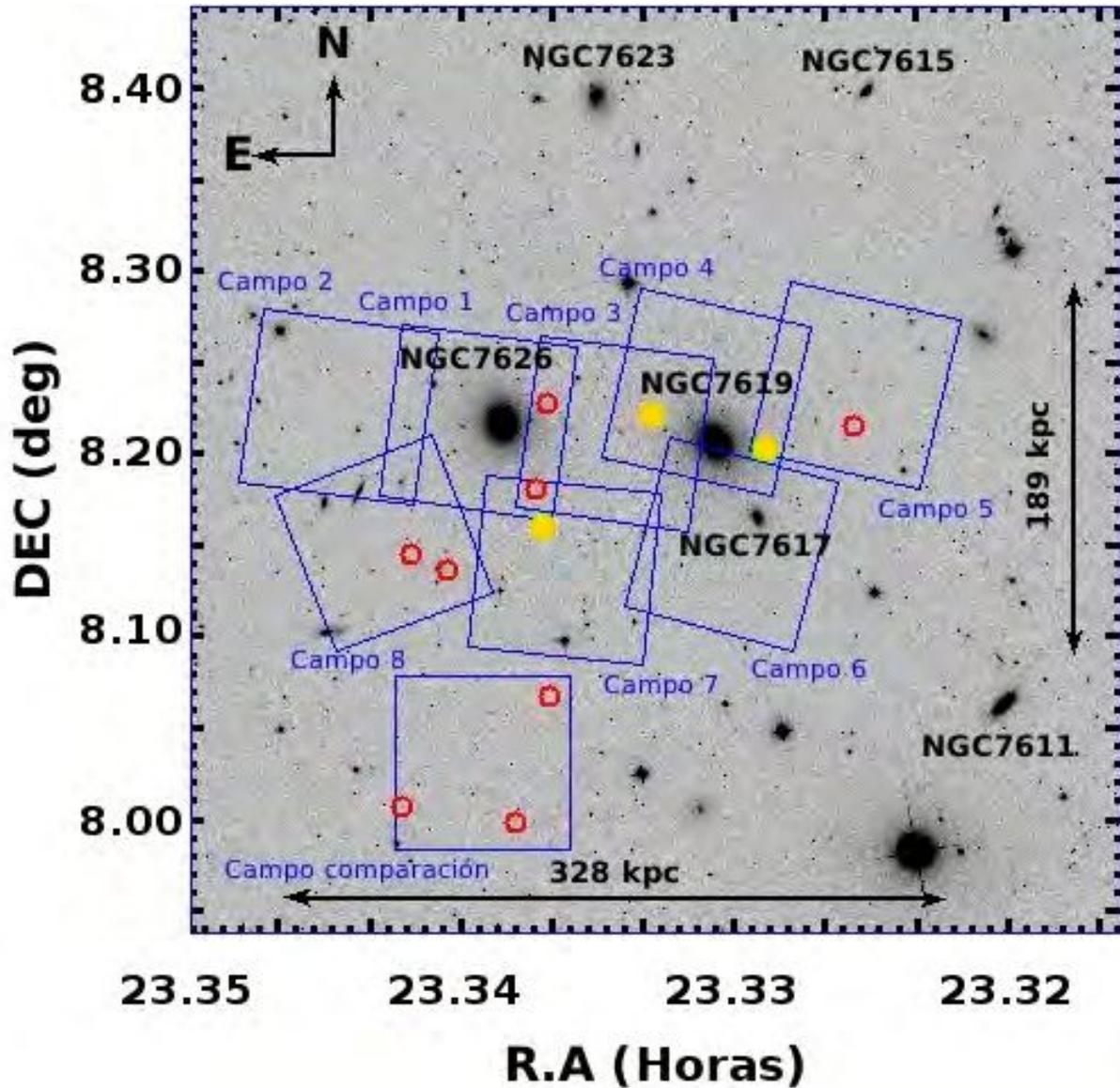
En cuanto a los colores, se puede evidenciar que la galaxia más roja de ambas muestras ( $(g' - r')_0 = 1.11$ ) es una de nuestras candidatas a UDG, que se ubica particularmente entre las dos galaxias dominantes. En el caso específico de nuestras candidatas, del panel derecho se puede evidenciar que las galaxias más azules parecen ubicarse exclusivamente hacia el sur de NGC 7626. Por su parte, si bien el número de objetos es bajo, las galaxias con colores intermedios parecieran mostrar una distribución en dirección *EO*, preferencialmente alrededor de las dos galaxias dominantes. Finalmente, como ya se mencionó anteriormente, la galaxia más roja de la muestra se ubica entre las dos galaxias elípticas brillantes. En el caso de la muestra de Shi et al. (2017), no resulta evidente una ubicación proyectada preferencial según el color o el tipo (LSB o UDG) de objeto, aunque cabe mencionar que los objetos de esta muestra más cercanos en distancia proyectada a las galaxias dominantes son UDGs. Los objetos más rojos de esa muestra serían galaxias LSB, a diferencia de nuestro caso, aunque el color de esos objetos no alcanza valores tan altos como el del objeto más rojo de nuestra selección.

Adicionalmente, en la Figura 3.19 trazamos el círculo negro que es el radio virial<sup>1</sup> de 1° (o 0.9 Mpc a la distancia de NGC 7626) reportado por Gourgoulhon et al. (1992).

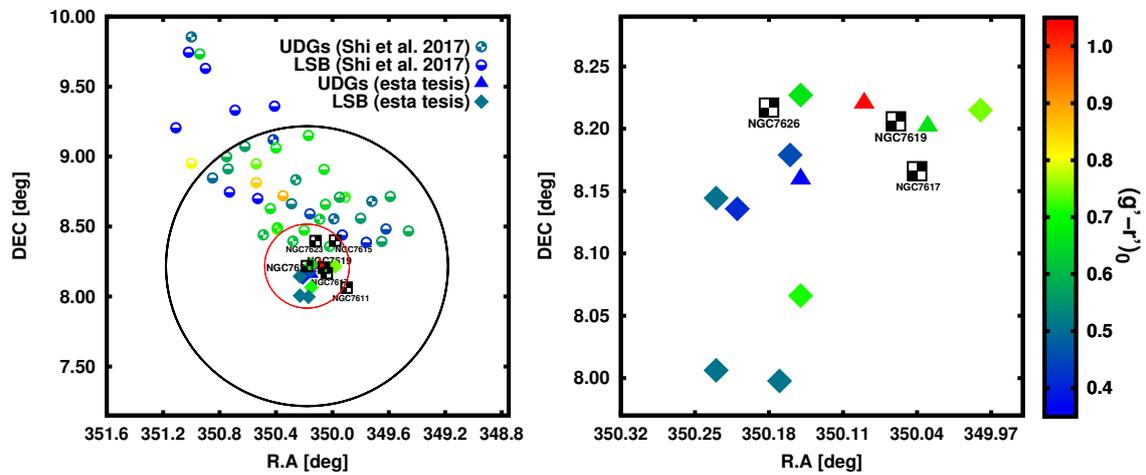
Además, todas las candidatas de este trabajo están dentro del círculo rojo que señala el 0.3 del radio virial (proyectadas) del grupo de Pegasus I. Por lo tanto, es probable que todas nuestras candidatas a galaxias LSB de Pegasus I sean miembros del grupo. Esta asociación ambiental es totalmente consistente con nuestra suposición de una distancia de 50.8 Mpc para nuestras LSB en Pegasus I. A su vez, esta distancia muestra un buen acuerdo con los  $r_{\text{eff}}$  combinado con el diagrama de color- $R_{\text{eff}}$ . En la Figura 3.20 se presentan dos diagramas de color- $R_{\text{eff}}$  que muestran la ubicación de las galaxias dSphs, LSB y las UDGs presentadas en otros trabajos de la literatura, junto con las galaxias LSB analizadas en esta tesis. Se puede apreciar en estos gráficos que, en general, las galaxias LSB y UDGs parecen mostrar un rango de colores mucho más amplio que las galaxias típicas de tipo temprano. Según el criterio de definición de UDG establecido por van Dokkum et al. (2015):  $r_{\text{eff}} \gtrsim 1.5$ , verifica que tres candidatas a galaxias LSB analizadas en este trabajo pueden clasificarse como UDGs.

---

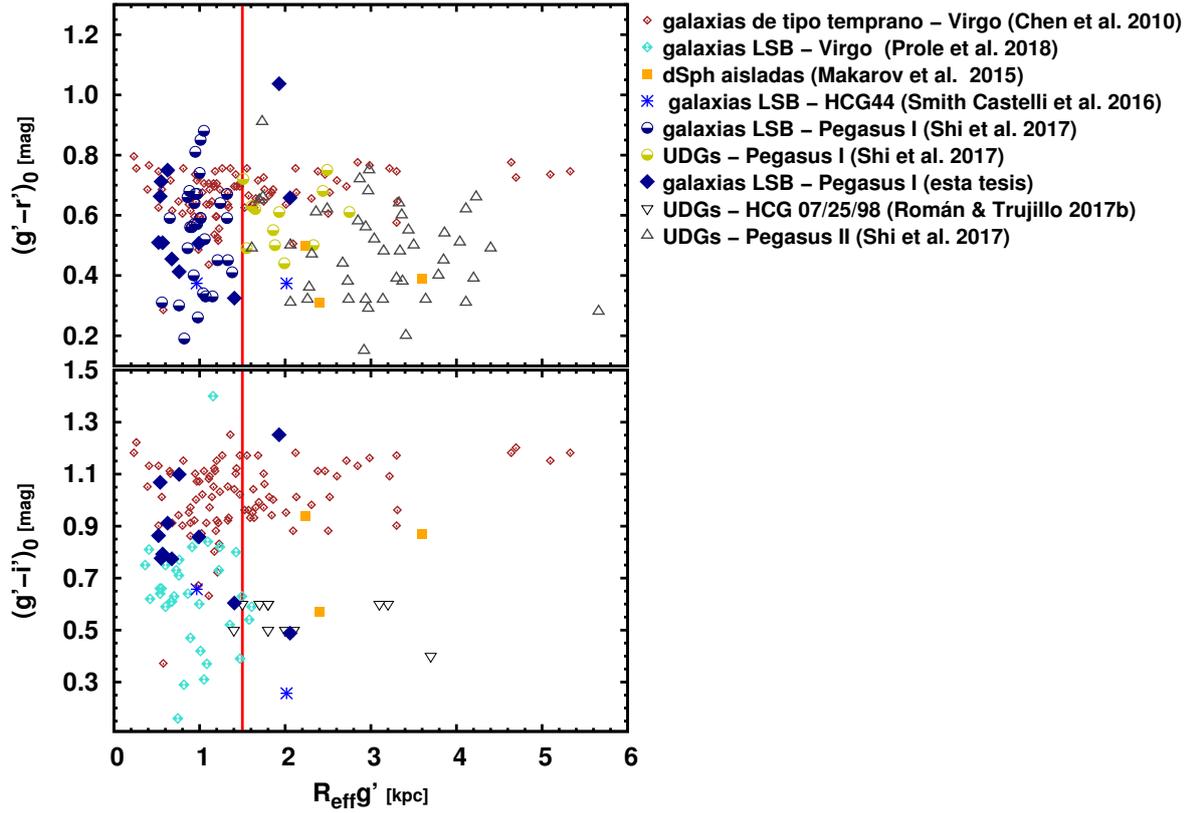
<sup>1</sup>El radio virial es el radio alrededor de una estructura (una galaxia, un cúmulo) dentro del cual la densidad es 200 veces mayor que la densidad de fondo promedio.



**Figura 3.18.** Mosaico de  $30.5 \times 30.5$  arcmin en el filtro  $r'$  de SDSS DR12 mostrando la región central del grupo de Pegasus I. Los cuadrados azules representan los marcos Gemini-GMOS usados en este trabajo (5.5 arcmin de tamaño). Su designación corresponde al orden en que se observó cada marco durante nuestro estudio de Pegasus I con Gemini. Los círculos rojos indican la ubicación de las ocho candidatas LSB y los círculos amarillos indican las tres candidatas UDGs. Las flechas grandes representan las escalas espaciales cubiertas por nuestros campos Gemini-GMOS. El norte está arriba y el este a la izquierda.



**Figura 3.19.** Panel izquierdo: distribución espacial en función de los colores  $(g' - r')_0$  de todas las candidatas LSB y UDGs reportadas por Shi et al. (2017) y las detectadas en este trabajo en el grupo de Pegasus I. El círculo negro es el radio virial de  $1^\circ$  (o 0.9 Mpc a la distancia de NGC 7626) reportado por Gourgoulhon et al. (1992). El círculo rojo señala el 0.3 del radio virial que es la región donde se ubican las candidatas de este trabajo. Panel derecho: distribución espacial en la región central de Pegasus I en función de los colores  $(g' - r')_0$  de las LSB y UDGs detectadas en este trabajo.



**Figura 3.20.** DC- $R_{\text{eff}}$  de las galaxias de tipo temprano en la región central del cúmulo de Virgo (Chen et al. 2010), mostrando la ubicación de las galaxias LSB presentadas en este trabajo adoptando que están a la distancia media entre NGC 7619 y NGC 7626. Incluimos diferentes muestras de galaxias LSB, dSph y UDGs reportadas en la literatura. Estas galaxias son: *Cúmulo de Virgo* (Chen et al. 2010), *galaxias LSB - Virgo* (Prole et al. 2018), *dSphs aisladas* (Makarov et al. 2015), *galaxias LSB - HCG 44* (Smith Castelli et al. 2016), *LSB/UDGs - Pegasus I* (Shi et al. 2017), *UDGs - HCG 07, HCG 25 y HCG 98* (Román & Trujillo 2017b) y *UDGs - Pegasus II* (Shi et al. 2017). Las líneas verticales rojas indican el criterio de definición de UDGs establecido por van Dokkum et al. (2015):  $r_{\text{eff}} \gtrsim 1.5$ .



# Galaxias análogas a las satélite de Andrómeda en Pegasus I?

---

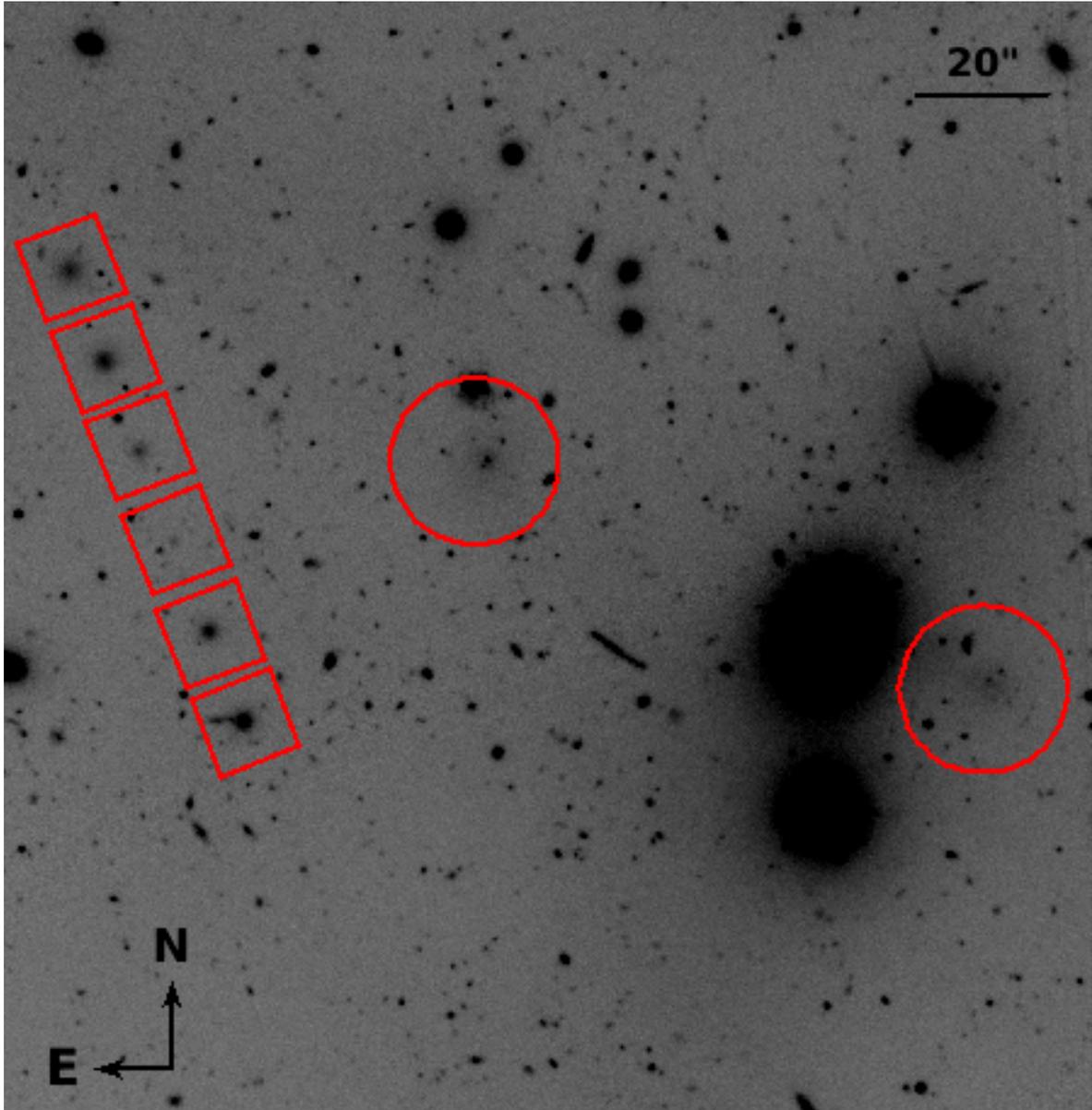
## 4.1. Introducción

En el Capítulo 3, Sección 3.3.2 se plantea una posible correlación entre la distancia de los cúmulos/grupos que albergarían galaxias de bajo brillo superficial y sus radios efectivos. Esta correlación parece indicar que las galaxias LSB poseen un tamaño real más grande a mayores distancias. En cambio, sus tamaños aparentes resultan más pequeños a distancia lejanas. Este efecto podría deberse solamente a las limitaciones que resultan de observar estos tipos de objetos de bajo brillo superficial. Esto es, las LSB pequeñas observadas a grandes distancias podrían confundirse con objetos de fondo, mientras que aquellas galaxias LSB cercanas podrían no detectarse debido a sus tamaños angulares extremadamente grandes. Sin embargo, la probabilidad de encontrar galaxias LSB grandes en un volumen pequeño alrededor del Grupo Local resultaría baja. Recientemente, Müller et al. (2018) encontraron posibles UDGs extremadamente grandes en el grupo de Leo-I  $D \sim 10.7$  Mpc, donde la más grande tiene un  $r_{\text{eff}} = 1.3$  kpc. De confirmarse su pertenencia en este grupo, estos objetos pasarán a ser las UDGs más cercanas. La idea de que las muestras de galaxias con límites de magnitud y tamaños fijos están sesgadas al perder galaxias de bajo brillo superficial debido a las limitaciones en las observaciones fue previamente propuesta por Davies et al. (1994).

## 4.2. Selección de candidatas

Con respecto a la posible presencia de un sesgo en la detección de galaxias LSB, nos preguntamos cuántos objetos similares a los satélites dSph de Andrómeda ( $D \sim 0.784$  Mpc) aparecerían a la distancia de Pegasus I ( $D \sim 50$  Mpc). En la Figura 4.1 mostramos los modelos de seis de estas galaxias obtenidas de los perfiles de brillo reportados por Caldwell et al. (1992) y Caldwell (1999), sobrepuesto en uno de los campos GEMINI-GMOS en Pegasus I.

Adicionalmente, comparamos los perfiles de brillo superficial de las galaxias LSB con los de los satélites de Andrómeda escaleados a la distancia de Pegasus I y usando la transformación de Fukugita et al. (1995) entre el Sistema de Johnson  $VRI$  y las bandas  $g', r'$  e  $i'$  del SDSS (ver Figura 4.2). Se puede ver que las dSphs de Andrómeda muestran tamaños entre  $2 < r_{\text{tot}} < 8$  arcsec y brillos superficiales centrales entre



**Figura 4.1.** Mosaico de  $2.85 \times 2.85$  arcmin en el filtro  $g'$  en el cual se muestran dos de las galaxias LSB detectadas en Pegasus I (círculos) presentadas en esta tesis. Superpuesto en este mosaico, a modo de comparación se muestra la apariencia que tendrían las dSphs de Andrómeda llevadas a la distancia de Pegasus I (cuadrados).

$24.5 < \mu_{0,g'} < 26$  mag arcsec $^{-2}$ . Su brillo superficial central es bastante bajo, pero aún más brillante que los de las galaxias LSB detectadas en Pegasus I. Sin embargo, en comparación, sus tamaños aparentes resultan más pequeños como se aprecia en las Figuras 4.1 y 4.2.

En este contexto, la pregunta que surge naturalmente es, ¿Cuántas LSB de tipo temprano se podrían perder en la inspección visual porque son muy pequeñas y fáciles de confundir con los objetos de fondo? Para buscar estos objetos decidimos utilizar el software SExtractor adoptando los siguientes criterios:

$$\text{CLASS\_STAR}_{(g',r',i')} \leq 0.2,$$

$$\begin{aligned}
 \text{FLAGS}_{(g',r',i')} &\leq 2, \\
 \text{Elipticidad}_{(g',r',i')} &\leq 0.2, \\
 2 &< r_{\text{tot}(g',r',i')} < 8 \text{ arcsec}, \\
 24.5 &\lesssim \mu_{0(g',r',i')} \lesssim 26 \text{ mag arcsec}^{-2}, \\
 0 &\lesssim (g' - i')_0 \lesssim 1.3 \text{ mag}, \\
 \text{y } 0 &\lesssim (g' - r')_0 \lesssim 1.2 \text{ mag}.
 \end{aligned}$$

Se adoptaron estos rangos de colores considerando los valores mostrados para las galaxias LSB de tipo temprano en la Sección 3.3.1.

Debido a que esta tesis se basa solamente en datos fotométricos nos esforzamos en construir una muestra lo más limpia posible de objetos similares a los satélites dSph de Andrómeda a la distancia de Pegasus I. Para ello, se utilizaron los criterios mencionados y eliminando la contaminación mediante una cuidadosa inspección visual. El índice de estelaridad (CLASS\_STAR) de SExtractor indica la probabilidad de que un objeto sea una estrella (CLASS\_STAR  $\sim 1$ ) o una galaxia (CLASS\_STAR  $\sim 0$ ), para seleccionar objetos que sean más propensos a ser galaxias se considera CLASS\_STAR  $\leq 0.2$ . El parámetro FLAGS permite saber qué tan buena es la fotometría realizada por SExtractor, se consideró FLAGS  $\leq 2$ . Los parámetros de salida de SExtractor fueron los mismos en todos los filtros con el fin de homogeneizar la información en todos ellos y así eliminar posibles detecciones espurias que no se corresponden a fuentes reales.

### 4.3. Datos fotométricos

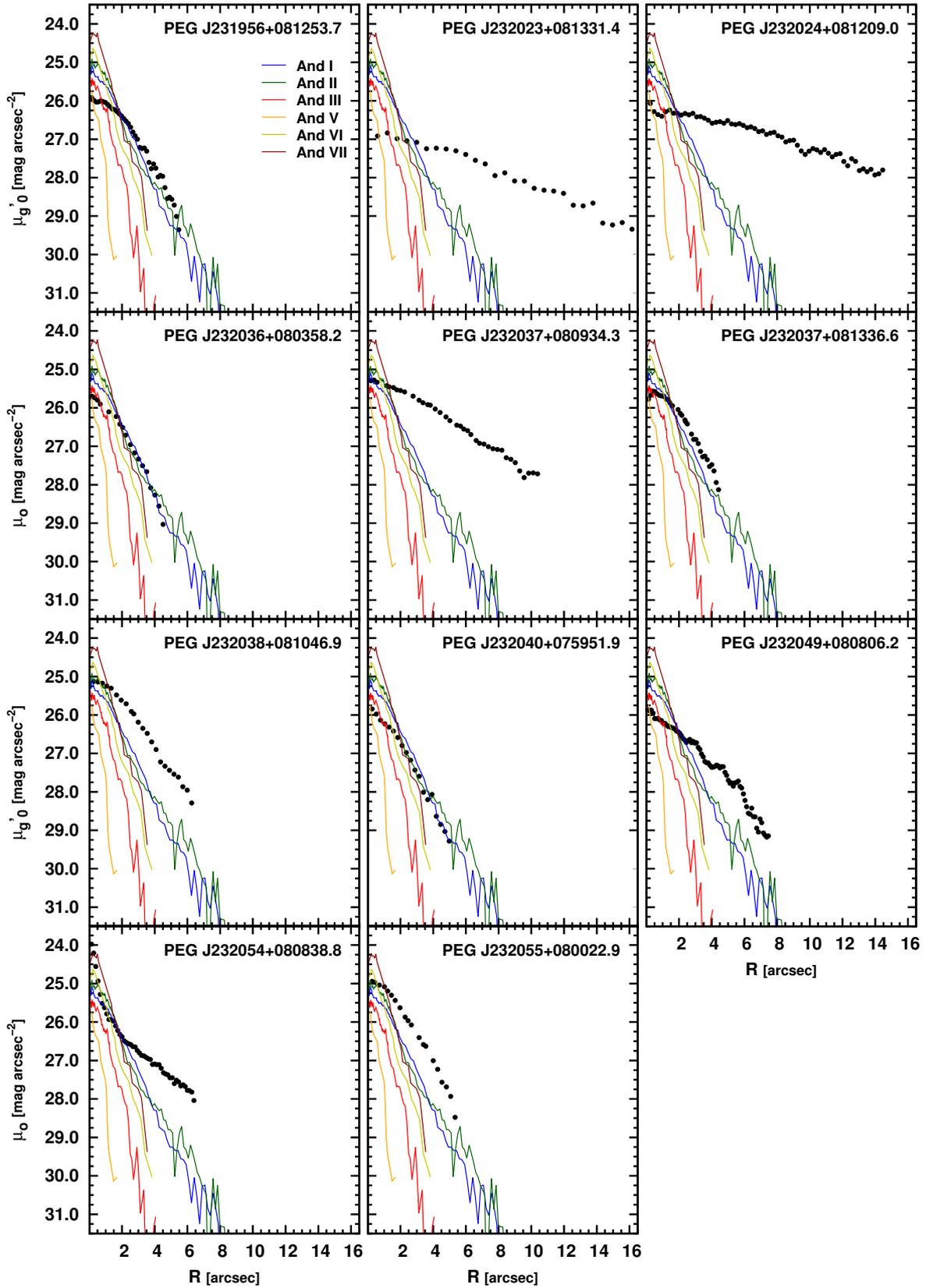
Sobre las imágenes profundas Gemini-GMOS que cubren el entorno cercano a las dos galaxias dominantes de Pegasus I: NGC 7626 y NCG 7619, se realizó la selección preliminar de setenta y siete galaxias candidatas cuya morfología resulta similar a la de las galaxias satélites de Andrómeda. La Figura 4.8 muestra la orientación de los diferentes campos analizados y la ubicación de estos objetos. Por su parte, en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5, se muestran las imágenes de estas candidatas en los filtros  $g'$  e  $i'$ , y sus respectivos mapas de color  $(g' - i')_0$ .

Dado que las galaxias LSB con tamaños similares a los de las satélites de Andrómeda serán difíciles de detectar en una inspección visual a la distancia de Pegasus I, la identificación de las mismas se realizó utilizando SExtractor en las imágenes Gemini-GMOS. Para ello, utilizando las tareas `ellipse` y `bmodel` de IRAF, se procedió a modelar las distribuciones de brillo superficial de las galaxias elípticas NGC 7626 y NGC 7619 y sus respectivos halos, incluyendo varios objetos extendidos. Luego, se restaron dichos modelos con el fin de poder identificar y medir las candidatas a galaxias LSB (para más detalles, ver la Sección 2.2). Posteriormente realizamos la fotometría con SExtractor utilizando el criterio de selección mencionado en la Sección 4.2, el cual permitió identificar setenta y siete objetos con características similares a los satélites de Andrómeda a la distancia de Pegasus I, y a las que llamaremos, de ahora en adelante como galaxias dSph ultra débiles debido a que las magnitudes aparentes se encuentran cercanas a  $m_{g'} \approx 24.85$ , que corresponde a  $M_{g'} \approx -8.65$  a la distancia de Pegasus I.

#### 4. Galaxias análogas a las satélite de Andrómeda en Pegasus I?

---

La ejecución consta de dos pasos principales: Primero, se aplica SExtractor en una de las imágenes para realizar la llamada detección de objetos. El resultado es un catálogo en formato ASCII, con las propiedades fotométricas, astrométricas y morfológicas de todos los objetos detectados en la imagen de referencia. En nuestro estudio, las imágenes de referencia utilizadas fueron siempre las imágenes observadas en el filtro  $r'$ , debido a que dichas imágenes presentan la mejor relación señal/ruido. Luego, SExtractor es ejecutado en la segunda imagen correspondiente al filtro  $g'$ . El programa es configurado para que, como parámetro de entrada lea un catálogo de entrada (en nuestro caso, los catálogos creados en el filtro  $r'$ ) y busque los objetos en la nueva imagen que existen en el catálogo de entrada en base a su posición. Si un objeto es encontrado, entonces las propiedades de este objeto son combinadas con las propiedades almacenadas en el catálogo anterior, y se crea un nuevo catálogo con las propiedades fotométricas de dicho objeto en ambos filtros. Finalmente, siguiendo el mismo proceso SExtractor es ejecutado en la imagen correspondiente al filtro  $i'$ .

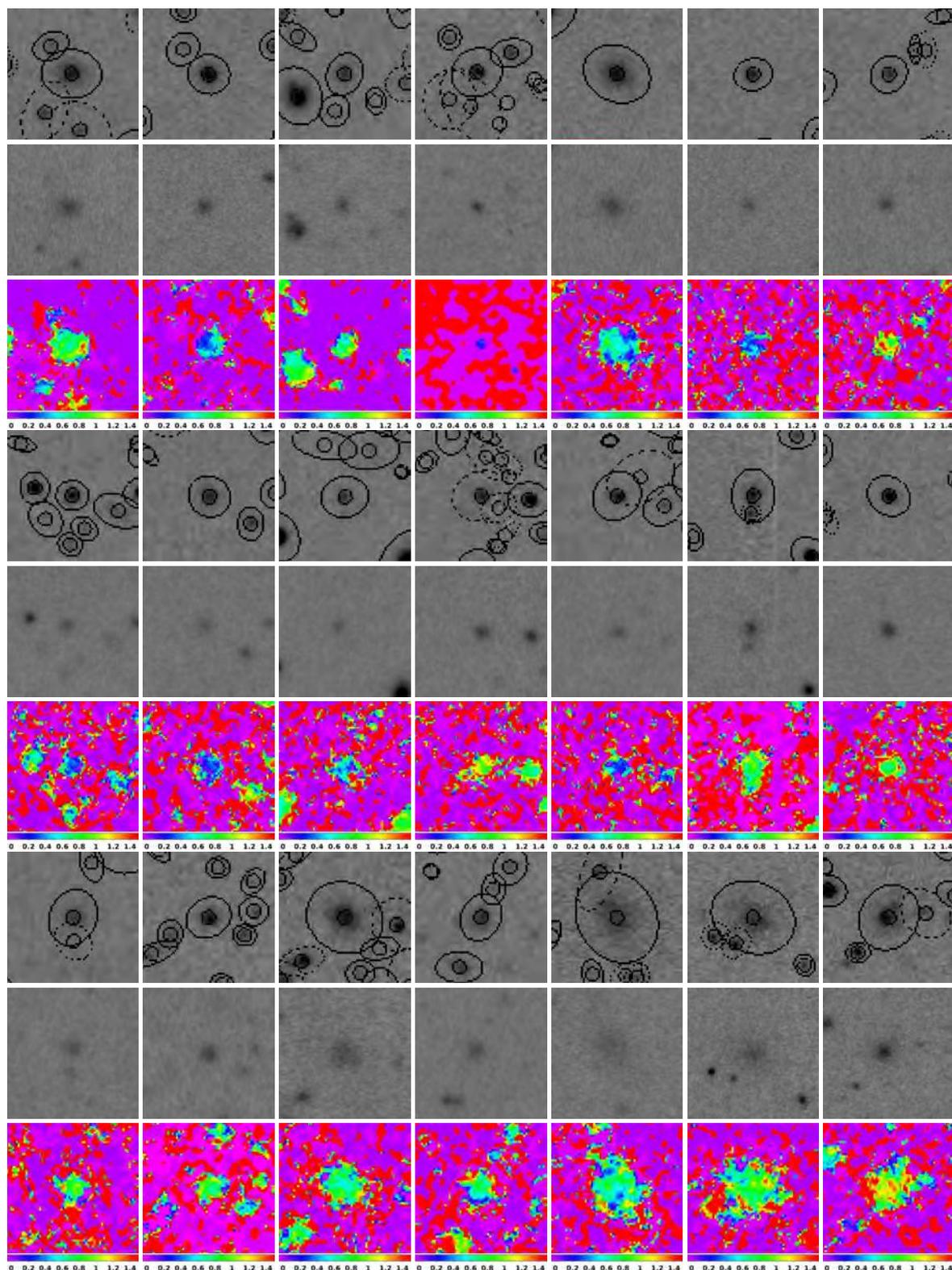


**Figura 4.2.** Comparación entre los perfiles de brillo  $g'$  de las galaxias LSB detectadas en Pegasus I (círculos negros) presentadas en esta tesis y las seis galaxias dSph satélite de Andr6meda (Caldwell et al. 1992; Caldwell 1999). Los perfiles de brillo en la banda  $V$  de las galaxias satélite de Andr6meda fueron transformados a la banda  $g'$  a trav6s de las relaciones presentadas por Fukugita et al. (1995), y se escalaron a la distancia de Pegasus I.

### 4.4. Identificación

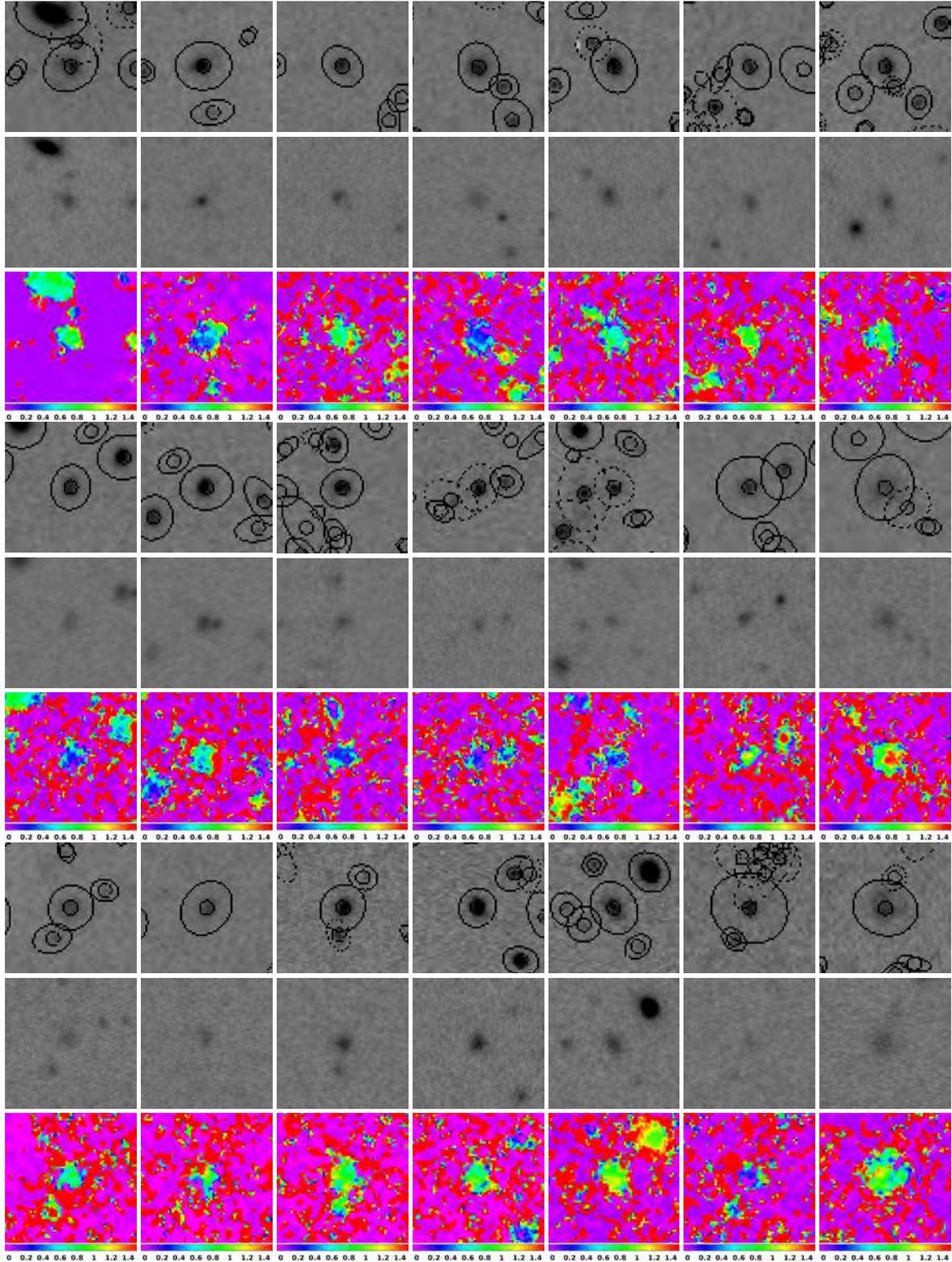
A pesar de los criterios adoptados para la selección que solo deja el  $\sim 0.2\%$  de los objetos del catálogo original, todavía queda mucha contaminación. La etapa final de la selección de los objetos candidatos a ser galaxias similares a las satélites de Andrómeda es eliminar la contaminación restante mediante una cuidadosa inspección visual. Una fuente importante de la contaminación restante son las galaxias espirales de fondo, que tienen un bajo brillo superficial. Hemos analizados algunos métodos para distinguir las galaxias dSph de las enanas espirales de fondo, pero resultó que la inspección visual es la forma más eficiente de distinguir las porque el ojo puede identificar con cierta facilidad si una galaxia tiene brazos espirales o no. Una desventaja importante es que una inspección visual es subjetiva y, en última instancia, es necesario la confirmación espectroscópica de todas las galaxias dSph ultra débiles. Para el propósito de esta tesis, resulta de especial importancia realizar una clasificación conservadora e introducir dos clases de dSph ultra débiles: dSph ultra débil segura y posible dSph ultra débil. El primero comprende galaxias que consideramos altamente probable como galaxias dSph ultra débiles reales. Esta clase incluye las galaxias con una morfología muy suave y difusa sin mostrar evidencias obvias de subestructura interna, y a su vez que los mapas de color no presenten colores muy rojos. Las posibles dSph ultra débiles tienen una menor probabilidad, pero no lo suficiente para ser descartadas. Estas posibles dSph ultra débiles tienen estructuras muy débiles que podrían ser parte de brazos espirales o revelar la presencia de estructuras tidales. Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran las galaxias dSph ultra débiles seguras y las posibles dSph ultra débiles. Por otra parte, la Figura 4.5 muestra los objetos que definitivamente son descartados a ser galaxias dSph ultra débiles debido a que claramente muestran cierta estructura de brazo espiral, o bien, la abertura que utilizó SExtractor para medir el brillo superficial central muestra la superposición de múltiples fuentes. Para cada objeto, se muestra la imagen en el filtro  $g'$  con la apertura que utilizó SExtractor, la imagen en el filtro  $i'$  y el mapa de color  $(g' - i')_0$ . En la imagen  $g'$ , los círculos representan la apertura fija en la cual se ha calculado el brillo superficial central (MAG\_APER), y las elipses corresponden a la apertura para calcular la magnitud total (MAG\_AUTO) en cada objeto.

Debido a que nuestros objetos son muy débiles y pequeños, para una adecuada inspección visual es importante que tengan un nivel de cielo plano, homogéneo, con un valor  $\sim 0$  ADU y sin estructuras espurias. Además, para detectar estructuras en los mapas de color, se debe en primer lugar normalizar las imágenes en los filtros  $g'$  e  $i'$  dividiéndolas por el correspondiente tiempo de exposición. Posteriormente, se procedió a recortar, para cada galaxia, una sección centrada en la misma de  $100 \times 100$  píxeles ( $16 \times 16$  arcsec). El tamaño de la imagen recortada tiene que ser lo suficientemente grande como para permitir estimar un valor del cielo local. Una vez realizado este paso, se encontró que el nivel de cielo resultante tiene un leve gradiente en torno a cada candidata. Como se mencionó previamente, el nivel de cielo debe ser plano y homogéneo, debido a que los objetos de estudio son muy débiles y pequeños. Entonces para corregir dicho gradiente se modeló ajustando un polinomio de Legendre de bajo orden mediante la tarea `imsurfit` de IRAF.



**Figura 4.3.** Candidatas seguras a galaxias análogas a las dSphs de Andr3meda a la distancia de Pegasus I. Para cada candidata, se muestra la imagen en el filtro  $g'$  con las aperturas que utiliz3 SExtractor, imagen en el filtro  $i'$  y el mapa de color  $(g' - i')_0$ . El tama1o de las im3genes es de  $10 \times 10$  arcsec. Los mapas est3n corregidos por extinc3n y enrojecimiento interestelar.

#### 4. Galaxias análogas a las satélite de Andrómeda en Pegasus I?



**Figura 4.4.** Candidatas posibles a galaxias análogas a las dSphs de Andrómeda a la distancia de Pegasus I. Para cada candidata, se muestra la imagen en el filtro  $g'$  con la apertura que utilizó SExtractor, imagen en el filtro  $g'$  y el mapa de color  $(g' - r')_0$ . El tamaño de las imágenes es de  $10 \times 10$  arcsec.

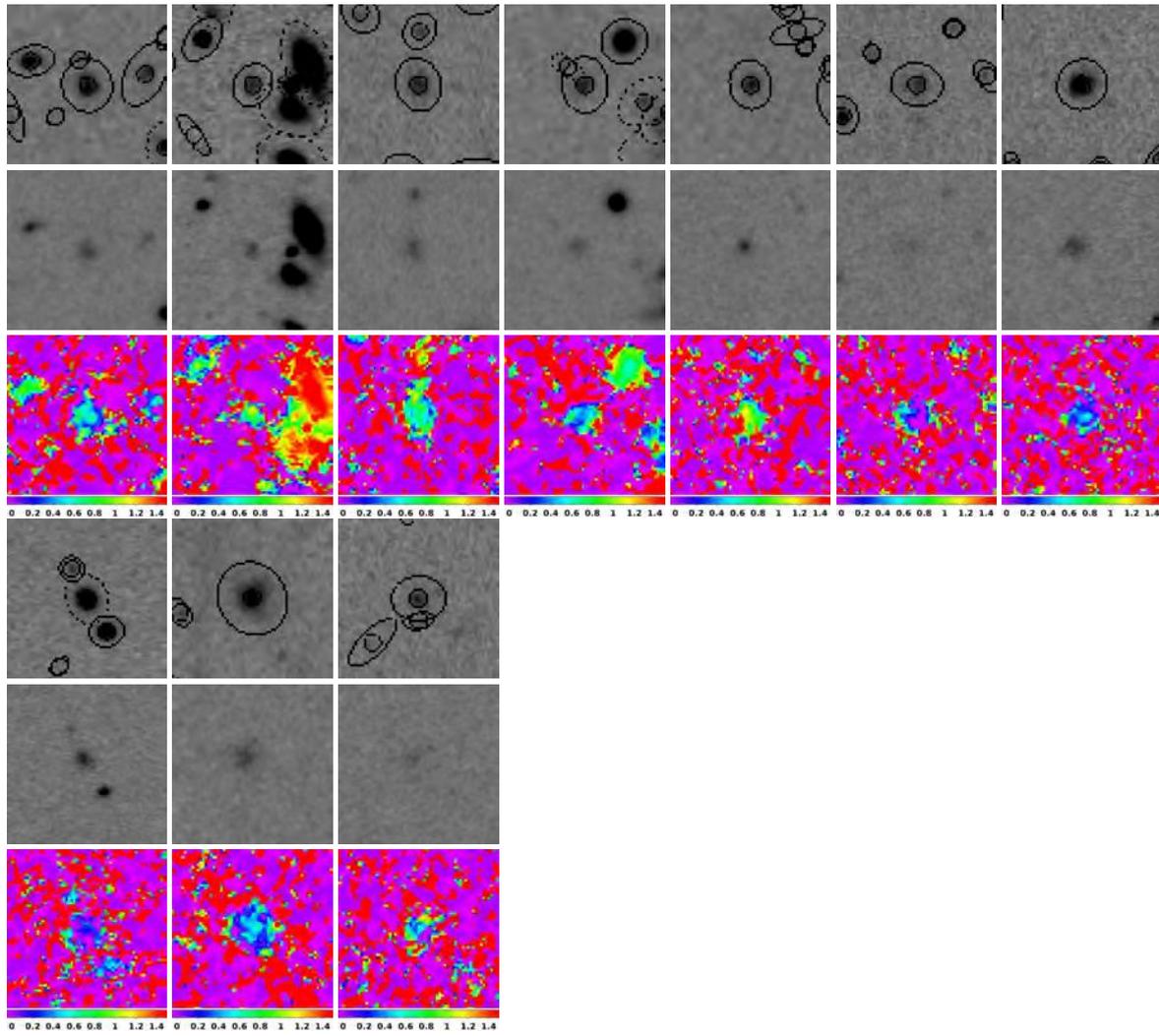
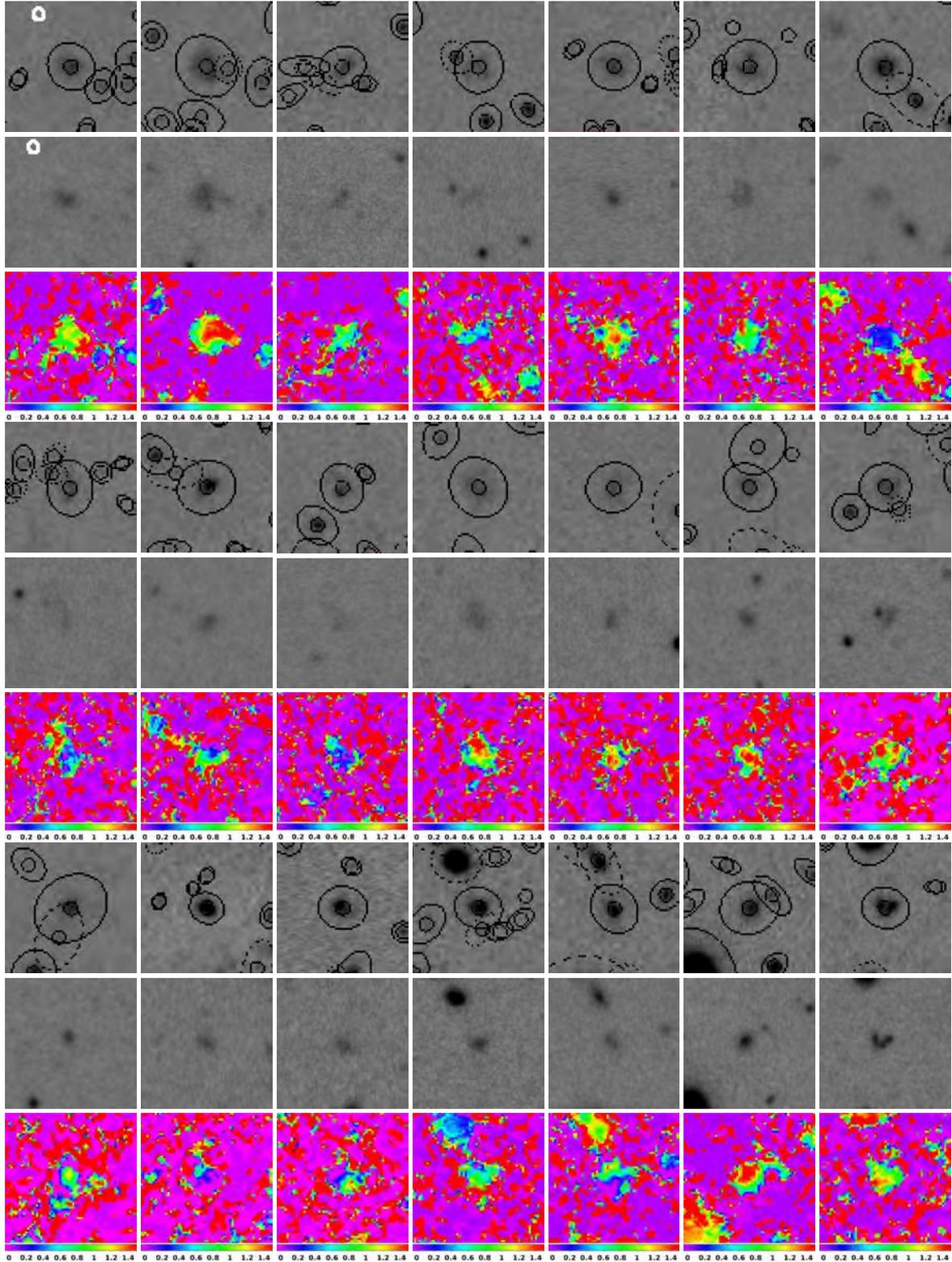


Figura 4.4. Continuación

#### 4. Galaxias análogas a las satélite de Andrómeda en Pegasus I?



**Figura 4.5.** Candidatas descartadas a galaxias análogas a las dSphs de Andrómeda a la distancia de Pegasus I. Para cada candidata, se muestra la imagen en el filtro  $g'$  con la abertura que utilizó SExtractor, imagen en el filtro  $g'$  y el mapa de color  $(g' - r')_0$ . El tamaño de las imágenes es de  $10 \times 10$  arcsec.

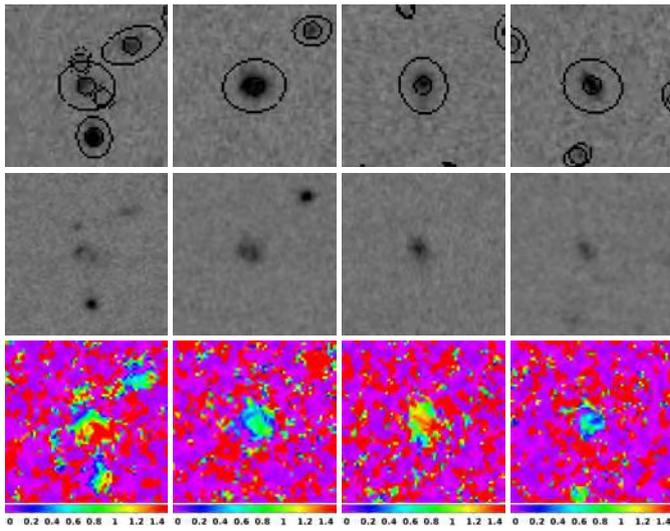


Figura 4.5. Continuación

## 4.5. Diagramas Fotométricos de las Galaxias dSphs ultra-débiles

En la Figura 4.6 se presentan dos diagramas de color-magnitud que muestran la ubicación de las galaxias dSphs, LSB y las UDGs presentadas en otros trabajos de la literatura, junto con las candidatas seguras a galaxias dSphs ultra débiles analizadas en esta tesis, suponiendo que estas últimas están a la distancia de Pegasus I. Como ya se ha mencionado anteriormente se considera el módulo de distancia de Pegasus I como el obtenido de la distancia media de las dos galaxias dominantes, NGC 7619 y NGC 7626. Como referencia, también se muestra la secuencia roja definida por una submuestra de galaxias de tipo temprano en la región central del cúmulo de Virgo (Chen et al. 2010) y una muestra de galaxias dE/dS0 en el grupo NGC 5044 (Buzzoni et al. 2012).

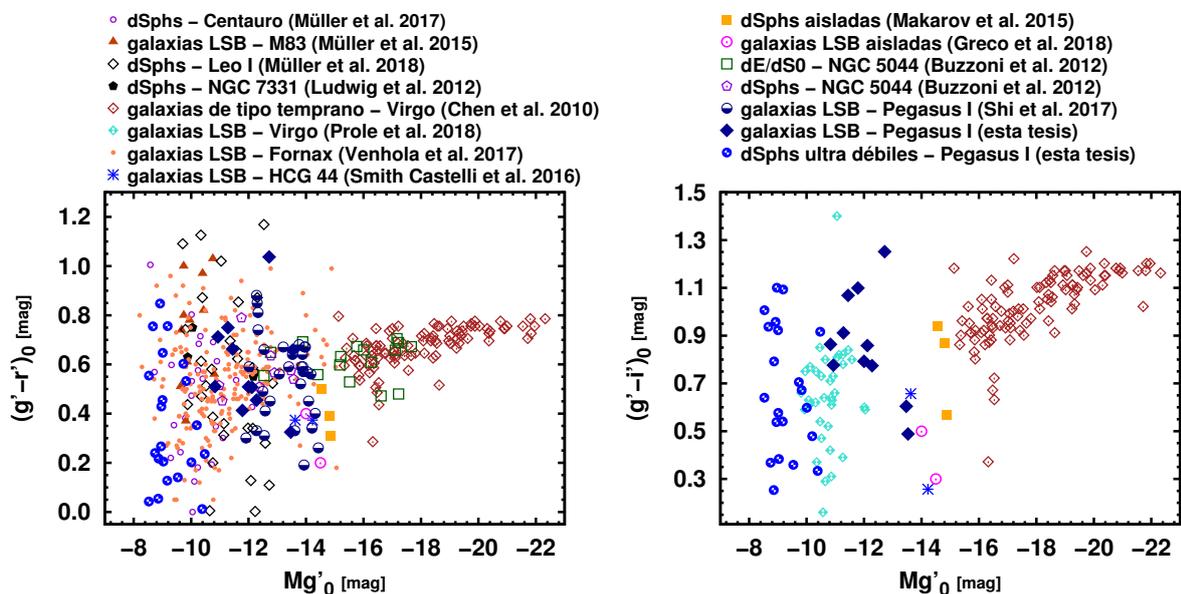
Recordando lo analizado en la Sección 3.3.1, se puede apreciar en estos gráficos que, en general, las galaxias LSB parecen mostrar un rango de colores mucho más amplio que las galaxias típicas de tipo temprano. En el caso particular de los objetos dSphs ultra débiles identificados en Pegasus I, tienden a seguir la secuencia roja de galaxias de tipo temprano o mostrar colores más azules. Sorprendentemente, las galaxias LSB más rojas de las muestras consideradas se encuentran en entornos relativamente ricos, como M 83, Leo I y Pegasus I, mientras que sus colores son mucho más azules que los esperados para el cirrus de la Vía Láctea ( $(g' - r') = 1.33 - 2.03$ ; Ludwig et al. 2012). Por el contrario, las galaxias LSB que se encuentran en forma aislada o dentro de los grupos compactos de Hickson siguen la secuencia roja de las galaxias de tipo temprano o muestran colores más azules. Las galaxias LSB reportadas en el cúmulo de Virgo, con la excepción de un solo objeto, también se comportan de la misma manera.

En la Figura 4.7 se presenta el diagrama de  $\langle \mu_{\text{eff}} \rangle$ –luminosidad para diferentes muestras de galaxias LSB presentadas en otros trabajos de la literatura. Como referencia, se muestra la ubicación de submuestras de galaxias de tipo temprano en el cúmulo de Virgo (Smith Castelli et al. 2013) y el grupo NGC 5044 (Buzzoni et al. 2012).

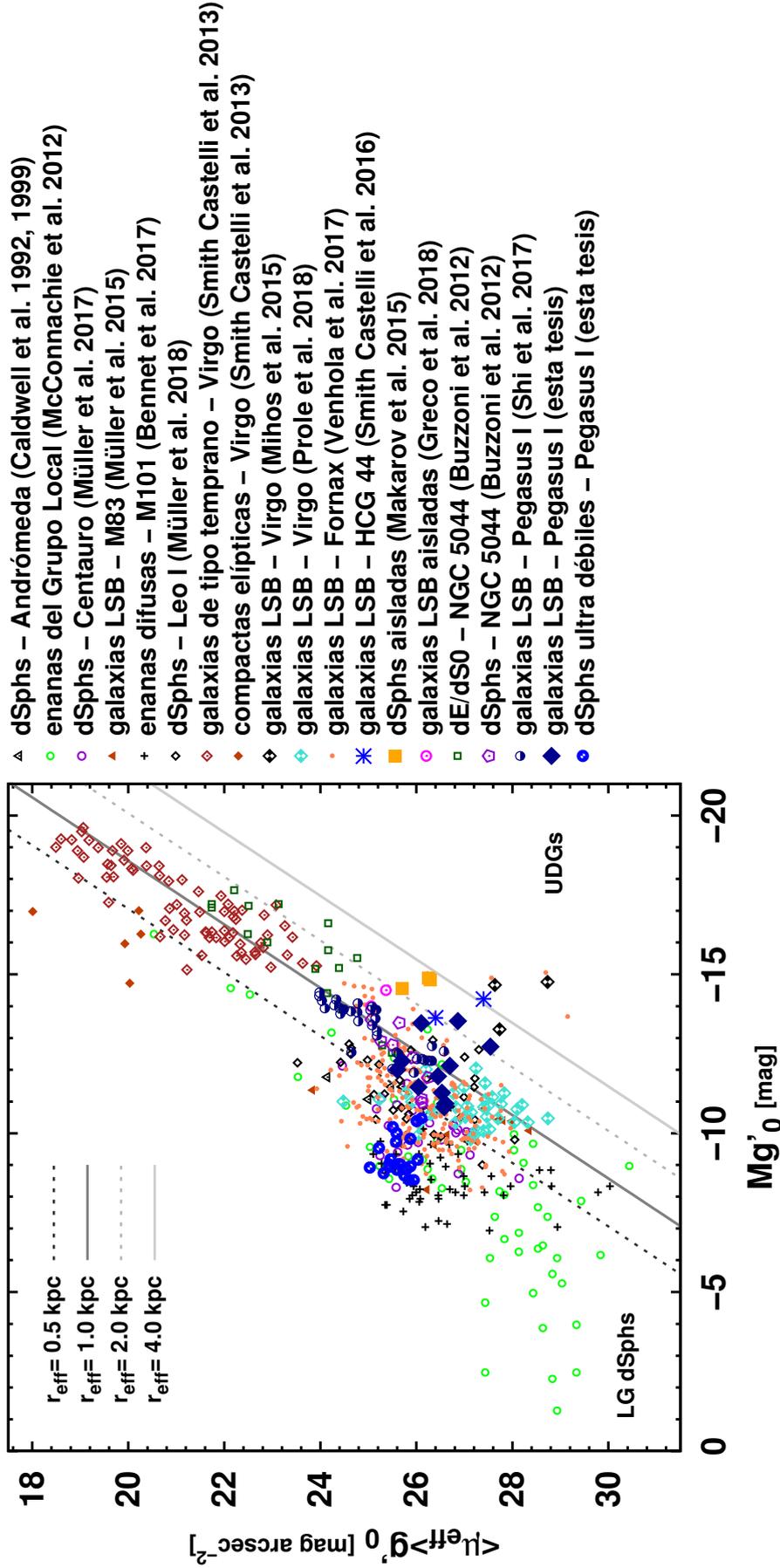
Recordando lo analizado en la Sección 3.3.2, este gráfico muestra que las galaxias típicas de tipo temprano de diferentes luminosidades tienden a colocarse alrededor del lugar de radio efectivo constante ( $r_{\text{eff}} = 1$  kpc) con una baja dispersión, independientemente de su entorno, como ya se informó (por ejemplo, Smith Castelli et al. 2012, 2013, y referencias allí citadas). Por el contrario, las galaxias LSB tienden a mostrar un rango más amplio en  $r_{\text{eff}}$ , que crece en forma sostenida desde las galaxias dSph pertenecientes al Grupo Local (LG) (las galaxias LSB más pequeñas detectadas hasta ahora) a las llamadas UDGs en grupos y cúmulos más distantes (que son los ejemplos más grandes de galaxias LSB). En particular, las galaxias dSphs ultra débiles detectadas en Pegasus I tienen radios efectivos en el rango ( $0.1 \text{ kpc} \leq r_{\text{eff}} \leq 0.36 \text{ kpc}$ ), es decir, similares a los radios efectivos de los sistemas LSB más pequeños entre las de las galaxias de tipo temprano. Esto muestra un buen acuerdo con lo presentado en el Capítulo 3, Sección 3.3.2 que plantea una posible correlación entre la distancia de los cúmulos/grupos que serían poblados por galaxias de bajo brillo superficial y sus radios efectivos. Esta correlación parece indicar que las galaxias LSB poseen un tamaño real más grande a mayores distancias. En cambio, sus tamaños aparentes resultan más pequeños a distancias lejanas. Este efecto sin dudas se debe solamente a las limitaciones que resultan de observar estos tipos de objetos de bajo brillo superficial. Esto es,

#### 4.5. Diagramas Fotométricos de las Galaxias dSphs ultra-débiles

las LSB pequeñas observadas a grandes distancias pueden fácilmente confundirse con objetos de fondo, o directamente perderse en el ruido del cielo.



**Figura 4.6.** Diagramas color-magnitud que muestran la ubicación de las candidatas seguras a galaxias dSphs ultra débiles presentadas en este trabajo, suponiendo que están a la distancia media entre NGC 7619 y NGC 7626 (círculos semi-rellenos de color azul). Como referencia, trazamos la secuencia roja definida por una submuestra de galaxias de tipo temprano en la región central del cúmulo de Virgo (diamantes abiertos de color bordó; Chen et al. 2010), y una muestra de galaxias dE/dS0 en el grupo NGC 5044 (cuadrados abiertos sin punto de color verde; Buzzoni et al. 2012). También incluimos diferentes muestras de LSB y dSphs reportadas en la literatura. Se identifican en el margen superior del panel según sus distancias o las del entorno donde se detectaron, en orden ascendente de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. Estas galaxias son: *dSphs - Centauro* (Müller et al. 2017), *galaxias LSB - M 83* (Müller et al. 2015), *dSphs - Leo I* (Müller et al. 2018), *dSphs - NGC 7331* (Ludwig et al. 2012), *galaxias LSB - Virgo* (Prole et al. 2018), *galaxias LSB - Fornax* (Venhola et al. 2017), *galaxias LSB - HCG 44* (Smith Castelli et al. 2016), *dSphs aisladas* (Makarov et al. 2015), *galaxias LSB aisladas* (Greco et al. 2018), *dSphs - NGC 5044* (Buzzoni et al. 2012), *LSB - Pegasus I* (Shi et al. 2017).



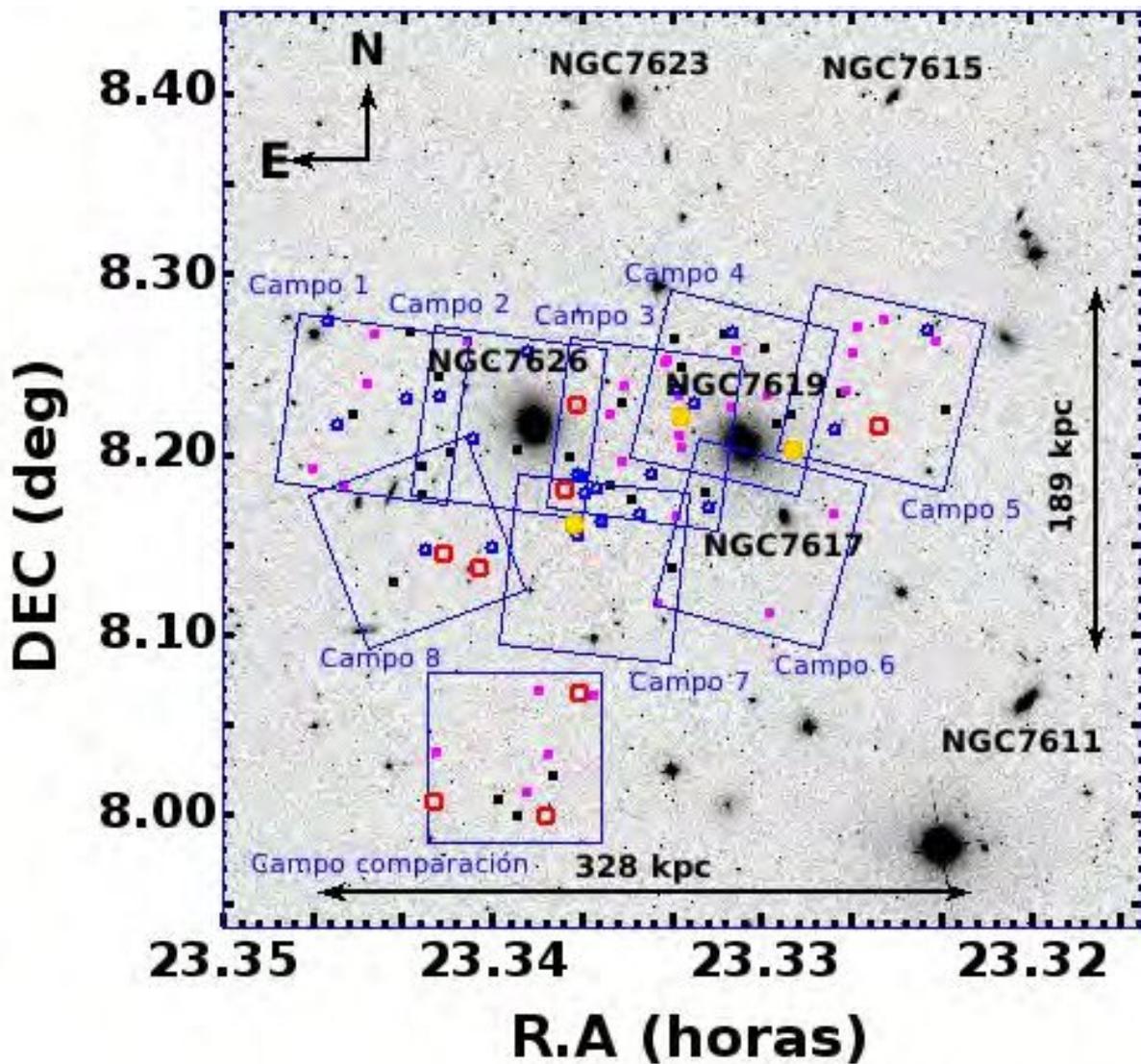
**Figura 4.7.** Diagrama  $(\mu_{\text{eff}})$ -luminosidad de las galaxias de tipo temprano en la región central del cúmulo de Virgo (Smith Castelli et al. 2013), mostrando la ubicación de las candidatas seguras a galaxias ultra débiles presentadas en este trabajo, suponiendo que están a la distancia media entre NGC 7619 y NGC 7626. Para comparar, también incluimos diferentes muestras de LSB y dSphs reportadas en la literatura. Se enumeran en el margen derecho del panel según sus distancias o las del entorno donde se detectaron, en orden ascendente de arriba hacia abajo. Estas galaxias son: *dSphs - Andrómeda* (Caldwell et al. 1992; Caldwell 1999), *enanas del Grupo Local* (McConnachie 2012), *dSphs - Centauro* (Müller et al. 2017), *galaxias LSB - M 83* (Müller et al. 2015), *enanas difusas - M 101* (Bennet et al. 2017), *dSphs - Leo I* (Müller et al. 2018), *galaxias LSB - Virgo* (Mihos et al. 2015; Prole et al. 2018), *galaxias LSB - Fornax* (Venhola et al. 2017), *galaxias LSB - HCG 44* (Smith Castelli et al. 2016), *dSphs aisladas* (Makarov et al. 2015), *galaxias LSB aisladas* (Makarov et al. 2018), *dSphs ultra débiles - Pegasus I* (Shi et al. 2017), *dSphs - NGC 5044* (Buzzoni et al. 2012), *galaxias LSB - Pegasus I* (esta tesis).

## 4.6. Distribución espacial

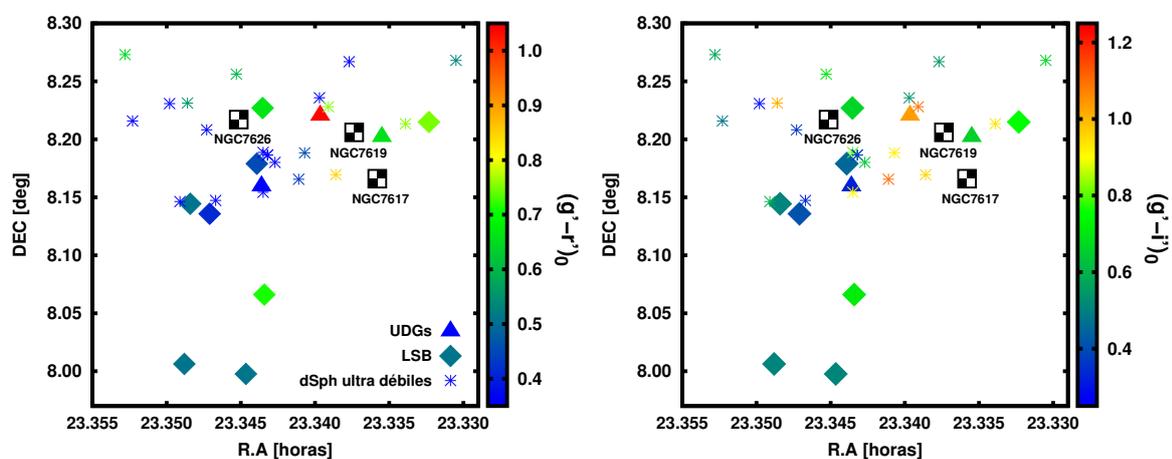
La Figura 4.8 muestra la distribución espacial proyectada de las candidatas a galaxias UDGs, LSB y dSphs ultra débiles analizadas en este trabajo. En ella, los círculos rojos indican la ubicación de cada una de las ocho candidatas LSB. Los puntos amarillos indican la ubicación de las tres candidatas UDGs. Los círculos azules indican la ubicación de las veintiuna candidatas seguras a dSphs ultra débiles. Los cuadrados magentas indican la ubicación de las treinta y una candidatas posibles a dSphs ultra débiles. Los cuadrados negros indican la ubicación de las veinticinco candidatas descartadas a dSphs ultra débiles. Recordando lo que se ha mencionado anteriormente, el grupo Pegasus I consiste de dos subestructuras centradas en las dos galaxias elípticas NGC 7619 y NGC 7626, las cuales se señalan en dicha figura. En ella, se puede apreciar que la distribución de las candidatas seguras a galaxias dSphs ultra débiles, a diferencia de las galaxias LSB, muestran una distribución espacial homogénea en los campos observados, excluyendo el campo de comparación donde no se encontró ninguna candidata. Si bien, como se ha mencionado anteriormente, dichos campos no mapean en forma simétrica la región central de Pegasus I, resulta evidente que las candidatas seguras a galaxias dSphs ultra débiles que hemos identificado se distribuyen exclusivamente en dirección  $EO$  en torno a las galaxias dominantes.

Acerca de los colores, en la Figura 4.9 se presenta la distribución espacial en función de los colores  $(g' - r')_0$  y  $(g' - i')_0$  de todas las LSB, UDGs y dSphs ultra débiles detectadas en Pegasus I. Recordando lo analizado en la Sección 3.4 se puede evidenciar que la galaxia más roja es una de las candidatas a UDG, que se ubica particularmente entre las dos galaxias dominantes. Del panel derecho se puede evidenciar que las candidatas dSphs ultra débiles más azules parecen ubicarse con tendencia hacia el  $SE$  de NGC 7626, coincidentemente con la ubicación proyectada de las LSB detectadas en la primera parte de este trabajo. Además, al igual que las LSB, las candidatas dSphs ultra débiles con colores intermedios parecieran mostrar una distribución en dirección  $EO$ , preferencialmente alrededor de las dos galaxias dominantes.

Por completitud, en la Figura 4.10 se presenta la relación entre los colores contra el cociente entre la distancia radial proyectada a NGC 7626 y el radio virial para nuestras candidatas LSB, UDGs y dSphs ultra débiles. Se puede observar que el subconjunto de galaxias LSB resulta ser el más homogéneo en lo que a color se refiere, ya que es el grupo que menor dispersión en color presenta, siendo su color medio  $\langle g' - r' \rangle \sim 0.64 \pm 0.44$ . En cuanto a su distribución espacial proyectada, las galaxias LSB identificadas en esta tesis muestran una extensión similar a las dSph ultra débiles. En el caso del color, éstas últimas muestran una dispersión mayor en comparación con las galaxias LSBs, siendo los objetos más azules de las tres muestras, pero pudiendo ser tan rojas como las LSBs. En contraste, las candidatas a galaxias UDGs identificadas en este trabajo se encuentran mucho más acotadas espacialmente que las galaxias LSBs o dSphs ultra débiles, encontrándose en el rango  $0.6 \lesssim R/R_{\text{vir}} \lesssim 0.16$ . Sin embargo, presentan la mayor dispersión en color de las tres muestras, pudiendo ser más azules que las candidatas a galaxias LSB, pero pudiendo también mostrar el color más rojo de las tres muestras.



**Figura 4.8.** Mosaico de 30.5 x 30.5 arcmin en el filtro  $r'$  de SDSS DR12 mostrando la región central del grupo de Pegasus I. Los cuadrados azules representan los marcos Gemini-GMOS usados en este trabajo (5.5 arcmin de tamaño). Su designación corresponde al orden en que se observó cada marco durante nuestro estudio de Pegasus I con Gemini. Los círculos rojos indican la ubicación de las ocho candidatas LSB. Los puntos amarillos indican la ubicación de las tres candidatas UDGs. Los círculos azules indican la ubicación de las veintiuna candidatas seguras a dSphs ultra débiles. Los cuadrados magentas indican la ubicación de las treinta y una candidatas posibles a dSphs ultra débiles. Los cuadrados negros indican la ubicación de las veinticinco candidatas descartadas a dSphs ultra débiles. Las flechas grandes representan las escalas espaciales cubiertas por nuestros campos Gemini-GMOS. El norte está arriba y el este a la izquierda.



**Figura 4.9.** Distribución espacial en función de los colores  $(g' - r')_0$  y  $(g' - i')_0$  de todas las candidatas LSB, UDGs y las dSphs ultra débiles detectadas en Pegasus I en este trabajo. Los rombos indican la ubicación de las ocho candidatas LSB, los triángulos indican la ubicación de las tres candidatas UDGs y los asteriscos la ubicación de las veintiuna candidatas seguras a dSphs ultra débiles. El norte se encuentra hacia arriba y el este hacia la izquierda.

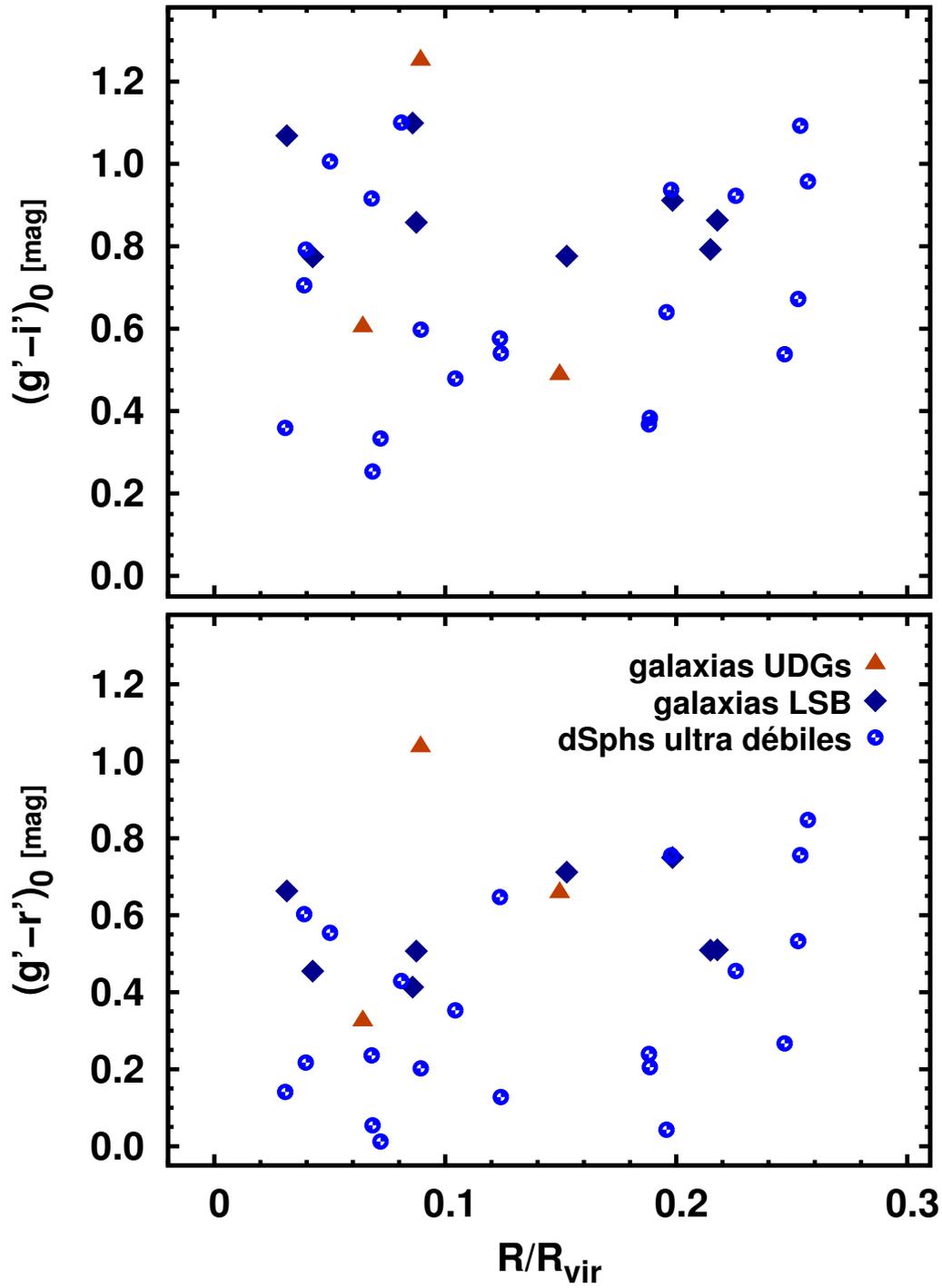


Figura 4.10. Relación entre los colores y el cociente entre la distancia radial a NGC 7626 y el radio virial para nuestras candidatas LSB, UDGs y dSphs ultra débiles.

---

## Capítulo 5

# Discusión y Conclusiones

---

En este trabajo identificamos una población de galaxias de bajo brillo superficial en la región central del grupo Pegasus I. La detección de estas galaxias está al límite de las capacidades técnicas de los telescopios de clase 8 m y el instrumental disponible actualmente, por lo que este estudio representa una oportunidad de explorar las propiedades fotométricas y estructurales de la población de más baja luminosidad de dicho grupo. De acuerdo a dichas propiedades, las galaxias LSB de Pegasus I presentan características similares a las de otras galaxias LSB reportadas en la literatura en otros medioambientes.

En particular, encontramos que tres de estas galaxias podrían clasificarse como galaxias ultra-difusas ya que cumplen con el criterio establecido por [van Dokkum et al. \(2015\)](#):  $\mu_{g'} \gtrsim 24$  mag/arcsec<sup>2</sup> y  $r_{\text{eff}} \gtrsim 1.5$  kpc. Cabe mencionar que el criterio no implica necesariamente que estos objetos sean evolutivamente distintos a la población general de las galaxias LSB sino que son, simplemente, objetos más extensos y difusos.

Dos de estas UDGs (PEG J232023+081331.4 y PEG J232024+081209.0) se encuentran a una distancia proyectada menor a 2 arcmin de NGC 7619, y la tercera UDG (PEG J232037+080934.3) se ubica a una distancia proyectada de  $\sim 3$  arcmin de NGC 7626. Esto es, como puede apreciarse en la Figura 3.18, las tres UDGs identificadas en esta tesis se ubican en la región interna y más densa de Pegasus I. El resto de las galaxias LSB detectadas en esta tesis no presentan ninguna peculiaridad distintiva, excepto PEG J232054+080838.8, ubicada a una distancia proyectada de  $\sim 5$  arcmin de NGC 7626, que muestra un núcleo.

A pesar de los esfuerzos realizados para comprender la formación de las UDGs, las observaciones hasta ahora han conducido a diversos escenarios. Por ejemplo, [van Dokkum et al. \(2015\)](#) sugirieron que las UDGs pueden ser galaxias tipo Vía Láctea “fallidas”, que perdieron su gas después de la primera generación de estrellas y que están fuertemente dominadas por materia oscura. Este escenario también parece estar de acuerdo con la dispersión de velocidades de una UDG: Dragonfly 44 en el cúmulo de Coma ([van Dokkum et al. 2016](#)). En esa misma dirección, la evidencia de alta abundancia de cúmulos globulares en la UDG Dragonfly 17 respalda la idea de que puede ser una galaxia fallida con una masa del halo similar a la reportada para la Nube Mayor de Magallanes ([Beasley & Trujillo 2016](#)).

Desde la perspectiva teórica, [Amorisco & Loeb \(2016\)](#) afirmaron que las UDGs pueden explicarse fácilmente mediante un modelo estándar de formación de discos, sugiriendo que las UDGs son galaxias enanas con un momento angular original especialmente alto. En este escenario, el alto momento angular hace que las UDGs sean

más planas y extendidas que las típicas dEs. Por lo general, los discos de las galaxias de disco se ajustan bien con un perfil exponencial, que corresponde a  $n \sim 1$  (Venhola et al. 2022). Este escenario de formación parece estar de acuerdo con los índices de Sérsic obtenidos para los perfiles de las UDGs medidos en esta tesis. En esa misma dirección, Rong et al. (2017) a través de simulaciones con *Millennium* y *Phoenix* de grandes cúmulos con el modelo formación semianalítico de galaxias, muestran que las UDGs son galaxias enanas genuinas que naturalmente pueden surgir de los modelos  $\Lambda$ CDM reproduciendo muy bien las propiedades observadas en las cercanías de los cúmulos. Por otro lado, la existencia de UDGs en el campo ha sido propuesta teóricamente por Di Cintio et al. (2017) quienes, utilizando simulaciones cosmológicas del proyecto *Numerical Investigation of a Hundred Astrophysical Objects* (NIHAO), muestran que las UDGs se forman naturalmente en halos enanos debido a episodios de pérdida de gas asociados con la formación estelar. Otra hipótesis presentada por Baushev (2018), sugiere que las UDGs pueden formarse como resultado de una colisión de galaxias. Esto se produce si las galaxias son jóvenes y contienen gran cantidad de gas de modo tal que al colisionar pueden expulsar todo el gas del sistema y así reprimir la formación estelar. Como resultado, las galaxias tienen un muy bajo brillo superficial y presentan las propiedades observacionales típicas de las UDGs. Recientemente, basándose en las simulaciones de *IllustrisTNG*, Sales et al. (2020) propusieron dos caminos de evolución para galaxias UDGs. Una población de galaxias enanas que se forman naturalmente de forma aislada (por ejemplo, Amorisco & Loeb 2016; Di Cintio et al. 2017), pero también se forman en cúmulos de galaxias debido a fuerzas de marea, desvaneciéndose después de extinguirse su formación estelar. Cabe destacar que encontramos que tres de nuestras candidatas a galaxias LSB muestran evidencia de un origen de marea.

Inicialmente se consideraba que los cúmulos y grupos de galaxias ricos eran el lugar natural para encontrar UDGs, ya que algunos de los estudios que respaldaban esa idea se centraron en Fornax (Muñoz et al. 2015), Coma (Koda et al. 2015; van Dokkum et al. 2015) y Virgo (Mihos et al. 2015; Davies et al. 2016), y en grupos más distantes como Pegasus II (Shi et al. 2017) y Abell 168 (Román & Trujillo 2017a). Sin embargo, hay evidencia de la existencia de UDGs en los grupos HCG 07, HCG 25 y HCG 98 Román & Trujillo (2017b), M 101 Merritt et al. (2016), HCG 44 Smith Castelli et al. (2016) y Leo-I Müller et al. (2018) que muestran que este tipo de objetos pueden también ser detectados en ambientes pobres y, por lo tanto, en diferentes medioambientes.

Curiosamente, de acuerdo con lo encontrado por van der Burg et al. (2016) y Manceira Piña et al. (2019), las UDGs no deberían sobrevivir cerca del centro de los cúmulos, ya que las fuerzas de mareas ejercidas sobre ellas perturbarían su formación. Cabe destacar que en este trabajo encontramos tres candidatas a UDGs, pero no es posible evaluar la distribución de UDGs en la región central de Pegasus I con este reducido número ya que nuestra región observada es de solo  $24.5 \times 14.5$  arcmin<sup>2</sup>.

Algo que también es interesante de mencionar es lo que se encuentra en el cúmulo de Abell 168 (Román & Trujillo 2017a) y los tres grupos aislados HCG 07/25/98 (Román & Trujillo 2017b), donde las propiedades estructurales de las UDGs cambian hacia el centro del cúmulo/grupo con una disminución en el radio efectivo, el brillo superficial medio más débil y un índice de Sérsic mayor. Estos resultados parecieran no coincidir al analizar el radio efectivo y el brillo superficial medio en la muestra de UDGs identificadas en esta tesis, en la región central del grupo Pegasus I, y la presen-

tada en las regiones más externas por [Shi et al. \(2017\)](#). Por otra parte, considerando todas las UDGs de Pegasus I reportadas hasta ahora, se encuentra que presentan un amplio rango de colores  $(g' - i')_0$  y  $(g' - r')_0$ , cubriendo los regímenes en color tanto de la secuencia roja como de la región azul. Esto indicaría que no existe una correlación entre el color de las UDGs y el entorno en el que residen ([Román & Trujillo 2017a](#); [Shi et al. 2017](#)).

En general, para las galaxias LSB los perfiles de brillo superficial son suaves y están bien caracterizados por modelos de Sérsic de una sola componente, con índice  $n \lesssim 2$ , por ejemplo en los grupos/cúmulos de NGC 7331 ([Ludwig et al. 2012](#)), M 81 ([Chiboucas et al. 2013](#)), Centauro ([Müller et al. 2015](#)) y Virgo ([Mihos et al. 2015](#)). En el caso particular de nuestras galaxias LSB detectadas en la dirección de Pegasus I, encontramos valores del índice de Sérsic en el rango  $0.44 < n < 0.97$ , que está de acuerdo con lo encontrado por distintos autores para galaxias de tipo temprano, por ejemplo, algunos de los trabajos que apoyan este criterio pueden verse en el grupo de NGC 5044 ([Buzzoni et al. 2012](#)), en el cúmulo de Abell 168 ([Román & Trujillo 2017a](#)) y en el cúmulo de Fornax ([Venholá et al. 2017](#)).

Otro punto interesante a destacar, es la correlación que parece existir entre la distancia de los cúmulos/grupos de las galaxias LSB y sus radios efectivos. Esta correlación parece indicar que las galaxias LSB tienen un tamaño real más grande a mayores distancias. En cambio, tienen tamaños aparentes más pequeños a distancia lejanas. Esta correlación sin dudas se debe solamente a las limitaciones que tenemos para observar estos tipos de objetos de bajo brillo superficial. Al observar a grandes distancias las LSB pequeñas se confundirían con objetos de fondo. Mientras que las LSB grandes cercanas, podrían no detectarse porque no entrarían en nuestro campo de visión. Esto subraya la dificultad extrema que plantea detectar este tipo de objetos, y los efectos de selección a los que puede dar lugar. Recientemente, [Müller et al. \(2018\)](#) encontraron posibles UDGs en el grupo de Leo-I extremadamente grandes. En caso de confirmarse que estas UDGs son miembros de Leo-I, estos objetos serían algunas de las UDGs más cercanas.

En este contexto, y a modo de conclusión, podemos señalar los siguientes puntos:

- En la región central del grupo Pegasus I, dentro de un área proyectada de  $24.5 \times 14.5 \text{ arcmin}^2$ , que cubre un radio menor a  $0.3R_{\text{vir}}$ , hemos identificado treinta y dos galaxias de tipo LSB, de las cuales tres presentan características de galaxias UDGs, y veintidós galaxias dSph ultra débiles. La densidad espacial de los objetos identificados en Pegasus I se encuentra en buen acuerdo con lo hallado en otros entornos como Fornax ([Muñoz et al. 2015](#); [Venholá et al. 2017](#)), Virgo ([Mihos et al. 2015](#); [Lim et al. 2020](#); [Junais et al. 2022](#)) y Perseo ([Gannon et al. 2022](#)).
- Las galaxias LSB identificadas en esta tesis complementan la población de galaxias de Pegasus I reportadas en el trabajo de [Shi et al. \(2017\)](#), cubriendo la región central y más interna del grupo, inexplorada hasta este momento en ese sentido.
- La distribución espacial de estos objetos muestra que las galaxias LSBs no se ubican en una distribución homogénea en los campos observados, aunque los campos no mapean en forma simétrica la región central de Pegasus I, resulta

evidente que presentan una distribución elongada en dirección *NO-SE*. Mientras que las UDGs se encuentran en la dirección *EO* en torno a las galaxias dominantes, NGC 7619 y NGC 7626, contrario con lo encontrado por [van der Burg et al. \(2016\)](#) y [Mancera Piña et al. \(2019\)](#), pero en buen acuerdo con lo que se ha identificado en medioambientes tales como Virgo ([Mihos et al. 2015](#); [Lim et al. 2020](#); [Junais et al. 2022](#)) y Fornax ([Muñoz et al. 2015](#); [Venholá et al. 2017](#)). Por su parte, las dSph ultra débiles muestran una distribución homogénea en dirección *EO* en torno a la región central de Pegasus I. Esto parece estar en buen acuerdo con lo encontrado para los satélites de la Vía Láctea y Andrómeda que se distribuyen en torno a sus galaxias dominantes definiendo un plano ([Pawlowski et al. 2013](#)).

- Los índices de Sérsic determinados para siete galaxias LSB se encuentran en el rango  $0.44 < n < 0.97$ , que está de acuerdo con lo encontrado por distintos autores para galaxias de tipo temprano de baja luminosidad, por ejemplo, los trabajos de [Cellone et al. \(1994\)](#) y [Buzzoni et al. \(2012\)](#). Una de las candidatas a galaxia LSB presentó dos componentes, la parte externa con  $1.08 < n < 1.26$  dependiendo del filtro. Mientras que los hallados para las UDGs se encuentra en el rango  $0.53 < n < 0.75$  que está en buen acuerdo con lo encontrado, por ejemplo, en el cúmulo de Abell 168 ([Román & Trujillo 2017a](#)) y en el cúmulo de Fornax ([Venholá et al. 2017](#)). En cuanto a las galaxias dSph ultra débiles tienen tamaños aparentes tan pequeños, entre  $2 < r_{\text{tot}} < 8$  arcsec, que no fue posible obtener los perfiles de brillo superficial, en consecuencia no se pudo modelar el perfil de Sérsic. Es probable que en la misma dirección que las galaxias satélites de la Vía Láctea y Andrómeda en el Grupo Local, sus índices de Sérsic se encuentren en el rango  $0.5 \lesssim n \lesssim 1.5$  ([Marchi-Lasch et al. 2019](#)).
- Con respecto a los colores, las galaxias LSB tienen color  $(g' - r')_0$  en el rango  $0.49 < (g' - r')_0 < 0.83$ , mientras que las galaxias UDGs presentan colores  $(g' - r')_0$  entre 0.4 y 0.74, salvo la UDG (PEG J232023+081331.4) que es la más roja, con  $(g' - r')_0 = 1.11$ , encontrándose en el límite de las UDGs más rojas encontradas en el cúmulo de Fornax por [Venholá et al. \(2022\)](#). Por su parte, las dSph ultra débiles muestran un rango más amplio  $0.0 \lesssim (g' - r')_0 \lesssim 0.85$  en comparación con las galaxias LSBs, siendo los objetos más azules de las tres muestras, pero pudiendo ser tan rojas como las LSBs de Pegasus I, las dSphs de Centauro ([Müller et al. 2017](#)) y las LSB de Fornax ([Venholá et al. 2017](#)).
- Las galaxias dSph ultra débiles seguras se diferencian sólo en lo que respecta a su distribución espacial (más concentrada hacia la zona central de Pegasus I) con respecto a las dSph ultra débiles probables o descartadas (con una distribución más extendida). En otros diagramas fotométricos tales como el diagrama color-magnitud o  $\langle \mu_{\text{eff}} \rangle$ -luminosidad las dSph ultra débiles seguras se distribuyen de manera similar a como lo hacen las dSph ultra débiles probables o improbables en cuanto a color, brillos, tamaños,  $\mu_{\text{eff}}$ , radios efectivos y magnitudes absolutas. Esto indica que, si bien se seleccionaron con criterios fotométricos similares, una inspección visual detallada permitió separar subconjuntos dominados por galaxias de fondo, de una muestra con mayoría de miembros genuinos de Pegasus I.
- En cuanto a la morfología, entre las candidatas a galaxias UDGs, dos de ellas

---

muestran evidencia de un origen de marea o de una interacción con una estructura de marea. Por su parte, dentro de las LSB, solo una de ellas muestra evidencia de un origen de marea. Esto sugiere que ningún único proceso ha dado lugar a todos los objetos dentro de la clase de galaxias de bajo brillo superficial. Es importante tener en cuenta que la detección de las UDGs es un desafío debido a su bajo brillo superficial y aún más, la detección de sus débiles efectos de mareas.

A partir de estos puntos podemos concluir que tanto las galaxias LSBs y UDGs identificadas en este trabajo podrían tener un origen en acuerdo con el trabajo de [Sales et al. \(2020\)](#) dadas sus características en cuanto a morfología, tamaño, color e índices de Sérsic. Así como también presentan similitudes con las galaxias UDGs encontradas en el cúmulo de Fornax por [Venhola et al. \(2022\)](#). Por su parte, las galaxias dSph ultra-débiles seguras parecieran responder al escenario de formación actualmente aceptado para las galaxias satélites de Andrómeda y la Vía Láctea en cuanto a su distribución espacial, morfología, tamaño y color.

Como posible trabajo a futuro, resultará interesante incrementar la identificación de galaxias LSB en general, y de galaxias UDGs en particular, tanto en las regiones centrales aún no exploradas de Pegasus I como de otros entornos no relevados en ese sentido. Esto posibilitará efectuar una evaluación más precisa de los diferentes escenarios de formación que podrían estar involucrados en sus orígenes, así como también aportar a la comprensión de los diferentes caminos evolutivos seguidos por estos objetos. Por su parte, la obtención de datos espectroscópicos para los objetos más brillantes y/o más cercanos de este tipo, utilizando telescopios de 8 – 10 m o, para todas las candidatas identificadas en este y otros trabajos, mediante el acceso a los telescopios de próxima generación ( $\sim 30$  m de diámetro), posibilitará establecer la vinculación real de las galaxias LSB o UDGs a los entornos a los que se las asocia a partir de sus características fotométricas.



# Bibliografía

---

- Aaronson, M., Mould, J., Huchra, J., et al. 1980, *ApJ*, 239, 12
- Abraham, R. G. & van Dokkum, P. G. 2014, *PASP*, 126, 55
- Alarcón Jara, A. G., Fellhauer, M., Matus Carrillo, D. R., et al. 2018, *MNRAS*, 473, 5015
- Amorisco, N. C. & Loeb, A. 2016, *MNRAS*, 459, L51
- Assmann, P., Fellhauer, M., Wilkinson, M. I., & Smith, R. 2013a, *MNRAS*, 432, 274
- Assmann, P., Fellhauer, M., Wilkinson, M. I., Smith, R., & Blaña, M. 2013b, *MNRAS*, 435, 2391
- Balcells, M. & Carter, D. 1993, *A&A*, 279, 376
- Baushev, A. N. 2018, *NA*, 60, 69
- Beasley, M. A. & Trujillo, I. 2016, *ApJ*, 830, 23
- Belokurov, V., Zucker, D. B., Evans, N. W., et al. 2007, *ApJ*, 654, 897
- Bennet, P., Sand, D. J., Crnojević, D., et al. 2017, *ApJ*, 850, 109
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&As*, 117, 393
- Binggeli, B., Sandage, A., & Tammann, G. A. 1985, *AJ*, 90, 1681
- Birkinshaw, M. & Davies, R. L. 1985, *ApJ*, 291, 32
- Boissier, S., Boselli, A., Ferrarese, L., et al. 2016, *A&A*, 593, A126
- Bothun, G. D., Beers, T. C., Mould, J. R., & Huchra, J. P. 1985, *AJ*, 90, 2487
- Bothun, G. D., Impey, C. D., Malin, D. F., & Mould, J. R. 1987, *AJ*, 94, 23
- Bothun, G. D., Schombert, J. M., Impey, C. D., & Schneider, S. E. 1990, *ApJ*, 360, 427
- Boulade, O., Vigroux, L. G., Charlot, X., et al. 1998, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 3355, SPIE, ed. S. D'Odorico, 614–625

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Buzzoni, A., Cellone, S. A., Saracco, P., & Zucca, E. 2012, *MNRAS*, 420, 3427
- Caldwell, N. 1999, *AJ*, 118, 1230
- Caldwell, N., Armandroff, T. E., Seitzer, P., & Da Costa, G. S. 1992, *AJ*, 103, 840
- Canizares, C. R., Donahue, M. E., Trinchieri, G., Stewart, G. C., & McGlynn, T. A. 1986, *ApJ*, 304, 312
- Cellone, S. A. 1999, *A&A*, 345, 403
- Cellone, S. A., Forte, J. C., & Geisler, D. 1994, *ApJS*, 93, 397
- Chen, C.-W., Côté, P., West, A. A., Peng, E. W., & Ferrarese, L. 2010, *ApJS*, 191, 1
- Chiboucas, K., Jacobs, B. A., Tully, R. B., & Karachentsev, I. D. 2013, *AJ*, 146, 126
- Chincarini, G. & Rood, H. J. 1976, *PASP*, 88, 388
- Collins, M. L. M., Chapman, S. C., Rich, R. M., et al. 2014, *ApJ*, 783, 7
- Conselice, C. J. 2018, *Research Notes of the American Astronomical Society*, 2, 43
- Dabringhausen, J. & Kroupa, P. 2013, *MNRAS*, 429, 1858
- Davies, J., Phillipps, S., Disney, M., Boyce, P., & Evans, R. 1994, *MNRAS*, 268, 984
- Davies, J. I., Phillipps, S., Cawson, M. G. M., Disney, M. J., & Kibblewhite, E. J. 1988, *MNRAS*, 232, 239
- Davies, J. I., Phillipps, S., & Disney, M. J. 1990, *MNRAS*, 244, 385
- Davies, L. J. M., Robotham, A. S. G., Driver, S. P., et al. 2016, *MNRAS*, 455, 4013
- de Vaucouleurs, G. & Ables, H. D. 1968, *ApJ*, 151, 105
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H. G., et al. 1992, *VizieR Online Data Catalog*, 7137
- Di Cintio, A., Brook, C. B., Dutton, A. A., et al. 2017, *MNRAS*, 466, L1
- Disney, M. J. 1976, *Nature*, 263, 573
- D'Onghia, E., Besla, G., Cox, T. J., & Hernquist, L. 2009, *Nature*, 460, 605
- Ferguson, H. C. 1989, *AJ*, 98, 367
- Ferrarese, L., Côté, P., Cuillandre, J.-C., et al. 2012, *ApJS*, 200, 4
- Flaugher, B., Diehl, H. T., Honscheid, K., et al. 2015, *AJ*, 150, 150
- Fujita, Y. 2003, *PASJ*, 55, 593
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., et al. 1996, *AJ*, 111, 1748

- Fukugita, M., Shimasaku, K., & Ichikawa, T. 1995, *PASP*, 107, 945
- Galaz, G., Milovic, C., Suc, V., et al. 2015, *ApJ*, 815, L29
- Gannon, J. S., Forbes, D. A., Romanowsky, A. J., et al. 2022, *MNRAS*, 510, 946
- Gourgoulhon, E., Chamaroux, P., & Fouque, P. 1992, *aap*, 255, 69
- Graham, A. W. & Worley, C. C. 2008, *MNRAS*, 388, 1708
- Greco, J. P., Greene, J. E., Strauss, M. A., et al. 2018, *ApJ*, 857, 104
- Hook, I. M., Jørgensen, I., Allington-Smith, J. R., et al. 2004, *pasp*, 116, 425
- Impey, C. & Bothun, G. 1989, *ApJ*, 341, 89
- Impey, C. & Bothun, G. 1997, *ARA&A*, 35, 267
- Impey, C., Bothun, G., & Malin, D. 1988, *ApJ*, 330, 634
- Jedrzejewski, R. & Schechter, P. L. 1988, *ApJ*, 330, L87
- Jedrzejewski, R. I. 1987, *MNRAS*, 226, 747
- Jimenez, R., Padoan, P., Matteucci, F., & Heavens, A. F. 1998, *MNRAS*, 299, 123
- Junais, Boissier, S., Boselli, A., et al. 2022, *A&A*, 667, A76
- Kim, D.-W., Kim, E., Fabbiano, G., & Trinchieri, G. 2008, *ApJ*, 688, 931
- Kim, E., Kim, M., Hwang, N., et al. 2011, *MNRAS*, 412, 1881
- Koda, J., Yagi, M., Yamanoi, H., & Komiyama, Y. 2015, *ApJ*, 807, L2
- Koposov, S. E., Belokurov, V., Torrealba, G., & Evans, N. W. 2015, *ApJ*, 805, 130
- Kuijken, K., Bender, R., Cappellaro, E., et al. 2002, *The Messenger*, 110, 15
- Lauberts, A. & Valentijn, E. A. 1989, *The Messenger*, 56, 31
- Lelli, F., Fraternali, F., & Sancisi, R. 2010, *A&A*, 516, A11
- Levy, L., Rose, J. A., van Gorkom, J. H., & Chaboyer, B. 2007, *AJ*, 133, 1104
- Lieder, S., Lisker, T., Hilker, M., Misgeld, I., & Durrell, P. 2012, *A&A*, 538, A69
- Lim, S., Côté, P., Peng, E. W., et al. 2020, *ApJ*, 899, 69
- Ludwig, J., Pasquali, A., Grebel, E. K., & Gallagher, III, J. S. 2012, *AJ*, 144, 190
- MacArthur, L. A., Courteau, S., & Holtzman, J. A. 2003, *ApJ*, 582, 689
- Makarov, D. I., Sharina, M. E., Karachentseva, V. E., & Karachentsev, I. D. 2015, *A&A*, 581, A82

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Mancera Piña, P. E., Aguerri, J. A. L., Peletier, R. F., et al. 2019, *MNRAS*, 485, 1036
- Marchi-Lasch, S., Muñoz, R. R., Santana, F. A., et al. 2019, *ApJ*, 874, 29
- Mateo, M. L. 1998, *ARA&A*, 36, 435
- Mayer, L., Kazantzidis, S., Mastropietro, C., & Wadsley, J. 2007, *Nature*, 445, 738
- McConnachie, A. W. 2012, *AJ*, 144, 4
- Merritt, A., van Dokkum, P., & Abraham, R. 2014, *ApJ*, 787, L37
- Merritt, A., van Dokkum, P., Danieli, S., et al. 2016, *ApJ*, 833, 168
- Metz, M. & Kroupa, P. 2007, *MNRAS*, 376, 387
- Mihos, J. C., Durrell, P. R., Ferrarese, L., et al. 2015, *ApJ*, 809, L21
- Miyazaki, S., Komiyama, Y., Sekiguchi, M., et al. 2002, *PASJ*, 54, 833
- Muñoz, R. P., Eigenthaler, P., Puzia, T. H., et al. 2015, *ApJ*, 813, L15
- Müller, O., Jerjen, H., & Binggeli, B. 2015, *A&A*, 583, A79
- Müller, O., Jerjen, H., & Binggeli, B. 2017, *A&A*, 597, A7
- Müller, O., Jerjen, H., & Binggeli, B. 2018, *A&A*, 615, A105
- Newton, O., Cautun, M., Jenkins, A., Frenk, C. S., & Helly, J. C. 2018, *MNRAS*, 479, 2853
- Pawlowski, M. S., Kroupa, P., & Jerjen, H. 2013, *MNRAS*, 435, 1928
- Pickering, T. E., Impey, C. D., van Gorkom, J. H., & Bothun, G. D. 1997, *AJ*, 114, 1858
- Prole, D. J., Davies, J. I., Keenan, O. C., & Davies, L. J. M. 2018, *MNRAS*, 478, 667
- Ramella, M., Geller, M. J., Pisani, A., & da Costa, L. N. 2002, *AJ*, 123, 2976
- Randall, S. W., Jones, C., Kraft, R., Forman, W. R., & O'Sullivan, E. 2009, *ApJ*, 696, 1431
- Richter, O.-G. & Huchtmeier, W. K. 1982, *A&A*, 109, 155
- Román, J. & Trujillo, I. 2017a, *MNRAS*, 468, 703
- Román, J. & Trujillo, I. 2017b, *MNRAS*, 468, 4039
- Romanishin, W., Strom, K. M., & Strom, S. E. 1983, *ApJS*, 53, 105
- Rong, Y., Guo, Q., Gao, L., et al. 2017, *MNRAS*, 470, 4231
- Sabatini, S., Davies, J., van Driel, W., et al. 2005, *MNRAS*, 357, 819

- Sales, L. V., Navarro, J. F., Peñafiel, L., et al. 2020, MNRAS, 494, 1848
- Schlafty, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, ApJ, 737, 103
- Sérsic, J. L. 1968, Atlas de Galaxias Australes
- Shi, D. D., Zheng, X. Z., Zhao, H. B., et al. 2017, ApJ, 846, 26
- Smith Castelli, A. V., Cellone, S. A., Faifer, F. R., et al. 2012, MNRAS, 419, 2472
- Smith Castelli, A. V., Faifer, F. R., & Escudero, C. G. 2016, A&A, 596, A23
- Smith Castelli, A. V., González, N. M., Faifer, F. R., & Forte, J. C. 2013, ApJ, 772, 68
- Sprayberry, D., Impey, C. D., Bothun, G. D., & Irwin, M. J. 1995, AJ, 109, 558
- Tody, D. 1986, in SPIE, Vol. 627, Instrumentation in astronomy VI, ed. D. L. Crawford, 733
- Tollerud, E. J., Bullock, J. S., Strigari, L. E., & Willman, B. 2008, ApJ, 688, 277
- Tonry, J. L., Dressler, A., Blakeslee, J. P., et al. 2001, ApJ, 546, 681
- Trentham, N. 1997, MNRAS, 286, 133
- Trinchieri, G., Fabbiano, G., & Kim, D.-W. 1997, A&A, 318, 361
- Tully, R. B., Courtois, H. M., Dolphin, A. E., et al. 2013, AJ, 146, 86
- Vader, J. P. & Chaboyer, B. 1994, AJ, 108, 1209
- van der Burg, R. F. J., Muzzin, A., & Hoekstra, H. 2016, A&A, 590, A20
- van Dokkum, P., Abraham, R., Brodie, J., et al. 2016, ApJ, 828, L6
- van Dokkum, P. G., Abraham, R., Merritt, A., et al. 2015, ApJ, 798, L45
- Venhola, A., Peletier, R., Laurikainen, E., et al. 2017, A&A, 608, A142
- Venhola, A., Peletier, R. F., Salo, H., et al. 2022, A&A, 662, A43
- Vigroux, L., Boulade, O., & Rose, J. A. 1989, AJ, 98, 2044
- Zwicky, F. 1942, PASP, 54, 185
- Zwicky, F., Karpowicz, M., & Kowal, C. T. 1965, “Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies”, Vol. V