

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y ASTROFÍSICA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Código de TFG: FTA15

Distribuciones Espectrales de Energía y cinemática de galaxias en cúmulos

Spectral Energy Distributions and kinematics of cluster galaxies

Supervisor: Armando Gil de Paz

Marina Martín Puebla

Grado en Física

Curso académico 2023-2024

Convocatoria Ordinaria de Junio

Calificación: 9,3

Análisis de Distribuciones Espectrales de Energía de galaxias en el cúmulo Abell 2390

Resumen:

En el estudio de la cosmología y la formación de estructuras a gran escala en el universo, los cúmulos de galaxias son una de las agrupaciones más interesantes para comprender los procesos físicos que determinan la evolución de las galaxias. Este trabajo estudia la morfología y el color de las galaxias en el cúmulo Abell 2390, situado a $z=0.23$, empleando datos proporcionados por Legacy Survey y el telescopio del proyecto internacional Sloan Digital Sky Survey. El análisis se lleva a cabo con información proporcionada por fotometría de banda ancha, empleando el software TOPCAT y Bagpipes. Mediante el análisis de la muestra, el objetivo principal es estudiar la distribución espectral de las galaxias que componen el cúmulo, para inferir propiedades fundamentales como la tasa de formación estelar, la edad, el desplazamiento al rojo o la masa estelar de las galaxias. Además, se diferenciará la muestra según el color, clasificando las galaxias como parte de la secuencia roja o la nube azul y según su morfología (galaxias de los primeros o últimos tipos). De esta forma, se deducen las propiedades de las galaxias en cúmulos a desplazamientos al rojo intermedios, teniendo en cuenta su distribución espectral de energía y los modelos de poblaciones estelares.

Abstract:

In the study of cosmology and the formation of large-scale structures in the universe, galaxy clusters are among the most intriguing groups for understanding the physical processes that determine galaxy evolution. This work examines the morphology and color of galaxies in the Abell 2390 cluster, located at $z=0.23$, using data provided by the Legacy Survey and the Sloan Digital Sky Survey international project. The analysis is conducted with broad-band photometry data, using the software TOPCAT and Bagpipes. Through the analysis of the sample, the main objective is to study the spectral distribution of the galaxies that make up the cluster, and to infer fundamental properties such as star formation rate, age, redshift, or stellar mass of the galaxies. Additionally, the sample will be differentiated by color, classifying the galaxies as part of the red sequence or the blue cloud and by morphology (early or late type galaxies). In this way, the properties of galaxies in clusters at intermediate redshifts are deducted, considering their spectral energy distribution and stellar population models.

Índice

1. Introducción y fundamento teórico	4
1.1. Objetivos	4
1.2. Cúmulos de galaxias	4
1.3. Síntesis de poblaciones estelares	4
1.4. Distribución de color y secuencia roja	5
1.5. Historia de formación estelar	6
1.6. Polvo	7
2. Proceso de selección del cúmulo objeto de estudio	7
2.1. CATARSIS	7
2.2. Datos fotométricos del cúmulo a estudiar	8
2.3. Principales herramientas	9
3. Análisis de la muestra	10
3.1. Descripción de los datos	10
3.2. Secuencia roja y nube azul	10
3.3. Distribución espacial de las galaxias	12
4. Resultados	13
4.1. Selección de galaxias por z fotométrico	15
4.2. Propiedades físicas de las galaxias de Abell 2390	16
4.3. Distribución de las galaxias de Abell 2390	19
5. Conclusiones	21
6. Agradecimientos	21
7. Bibliografía	22

1. Introducción y fundamento teórico

1.1. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es llevar a cabo un estudio de las propiedades de las galaxias en cúmulos a desplazamientos al rojo comprendidos entre $z=0.15$ y $z=0.23$ extraídos de la muestra CATARSIS en función de las propiedades globales de los cúmulos y en función de la distancia al centro del cúmulo. En concreto, analizar el cúmulo Abell 2390, situado a $z=0.23$ mediante la distribución espectral de energía de las galaxias que lo conforman. Se pretende derivar la relación de la densidad de galaxias tanto global como localmente dentro del cúmulo con las propiedades fotométricas o derivadas de la fotometría (colores, tasa de formación estelar) haciendo uso de bases de datos públicas de fotometría multi-frecuencia ya publicada de las galaxias miembros de este cúmulo.

1.2. Cúmulos de galaxias

En el universo actual las galaxias no se encuentran distribuidas uniformemente en el espacio, sino que forman estructuras de gran tamaño (Bond et al. 1996). Conforman grupos típicamente constituidos por un número de entre 5 y 100 galaxias y su tamaño varía desde cientos de kpc a 2 Mpc. Además, pueden formar sistemas mayores, los cúmulos, los sistemas ligados gravitacionalmente más grandes del universo, con cientos o miles de galaxias, de varios Mpc.

Los cúmulos de galaxias pueden agruparse en supercúmulos, las estructuras de mayor escala conocidas en el universo, con tamaños de decenas de Mpc. Los grupos y cúmulos resultan sistemas virializados, es decir, sistemas ligados en equilibrio en los que se cumple el Teorema del Virial. En cambio, los supercúmulos aún no están en equilibrio (Binney & Tremaine, 1987).

A mayor escala, en el orden de 100 Mpc, la distribución de materia del universo es aún inhomogénea: los supercúmulos se encuentran unidos por cadenas de galaxias en forma de filamentos o muros, que crean los bordes de grandes vacíos con apenas galaxias, de entre 10 y 150 Mpc de diámetro. Sin embargo, en el orden de 1000 Mpc, la distribución de materia parece estadísticamente homogénea (Schneider, 2015).

1.3. Síntesis de poblaciones estelares

Es posible obtener amplios datos de las galaxias tan solo a partir de la luz que emiten, la cual proviene de las estrellas que contienen. La síntesis de población estelar (SPS, del inglés, *stellar population synthesis*) tiene como objetivo el estudio de poblaciones estelares no resueltas, y permite determinar las características de estas poblaciones en las galaxias, a partir de sus espectros o su distribución espectral de energía (SED, *spectral energy distribution*) (Walcher et al. 2010). A partir de la distribución de densidad numérica de las estrellas en función de su masa, la composición química y su etapa evolutiva, se puede calcular la luz que emiten las galaxias. La teoría de la síntesis de poblaciones estelares interpreta la distribución espectral de las galaxias, es decir, cómo emiten a lo largo de todo el espectro electromagnético, como una superposición de los espectros de las estrellas (Bruzual & Charlot, 2003).

Los modelos de síntesis de población estelar realizan predicciones para poblaciones estelares simples (SSPs, *Single/Simple Stellar Populations*), que consideran estrellas nacidas simultánea e instantáneamente en un brote único de duración despreciable que presentan la misma edad y composición química (Maraston C., 2005). Los SPS buscan recuperar las propiedades fundamentales de las poblaciones estelares, responsables de la SED, como la masa de estrellas, el polvo, la metalicidad, la historia de formación estelar o el color.

Para establecer los modelos de evolución del espectro emitido por una SSP se necesitan tres componentes básicos: las tablas de isócronas para estudiar la evolución estelar, la función inicial de masas (IMF, *initial mass function*) y librerías de espectros estelares (teóricas o empíricas), que permitirán predecir los colores, el espectro integrado y la relación masa luminosidad. Las SSPs son la base de los modelos de SPS. Si se busca reproducir el espectro de una población estelar en una galaxia, es necesario hacer uso de las poblaciones estelares compuestas (CSP), que consideran estrellas formadas en diferentes épocas y con diferente composición química inicial. Además, tienen en cuenta la emisión y absorción del polvo, la emisión nebular y la evolución química (Conroy, 2013).

Es importante tener en cuenta que la distribución de las estrellas se ve modificada a medida que pasa el tiempo. Las estrellas masivas calientes abandonan antes la secuencia principal, disminuyendo así el número de estrellas azules luminosas. De esta forma, la distribución espectral de las galaxias también cambia con el tiempo. La distribución espectral de energía de una galaxia muestra por tanto su historia de formación y evolución estelar.

En el inicio de un cúmulo, el espectro y la luminosidad de sus estrellas estará dominado por las estrellas más masivas, O, B, que emiten radiación en el ultravioleta. El flujo por debajo de 1000\AA disminuye significativamente pasados diez millones de años y tras cien millones de años prácticamente desaparece. Simultáneamente, el flujo en el infrarrojo cercano va aumentando, ya que las estrellas masivas evolucionan a supergigantes rojas. Cerca de un gigaaño aparecen las primeras enanas blancas, que irán aumentando en número a la vez que disminuye el de estrellas en la secuencia principal. Así, la emisión en el visible y el infrarrojo se hace cada vez menor. De forma paulatina, el ultravioleta adquiere mayor importancia con la evolución de las estrellas en la rama asintótica de las gigantes hacia post-AGB y enanas blancas. Pasados tres gigaaños la contribución al ultravioleta sigue aumentando como consecuencia de las estrellas azules de la rama horizontal y las enanas blancas, hasta los cuatro gigaaños, donde el espectro de la población estelar se hace prácticamente constante (Schneider, 2015).

Resulta relevante también el *break* de los 4000\AA , que se vuelve visible en el espectro pasados diez millones de años. Este *break* es causado por el cambio en la opacidad de las atmósferas estelares frías en esta longitud de onda, debido a las transiciones de numerosas líneas metálicas (Bruzual & Charlot, 2003), de forma que permite estimar los desplazamientos al rojo de las galaxias de los primeros tipos a partir de sus propiedades fotométricas.

1.4. Distribución de color y secuencia roja

En este trabajo se dispondrá de datos fotométricos en diferentes bandas, en concreto, se partirá de las magnitudes y los flujos. A partir de las magnitudes se generará un diagrama color-magnitud que permitirá caracterizar la población de galaxias de la muestra.

Cuando se analiza una región con una sobredensidad de galaxias asociada a la presencia de un cúmulo relativamente cercano, los diagramas color-magnitud se emplean para distinguir las galaxias azules y rojas de los cúmulos, y estudiar sus perfiles de densidad sin necesidad de recurrir a los corrimientos al rojo, también denominado redshift o z (Nishizawa et al. 1997).

Para una población estelar joven, la evolución del color es muy rápida y la población se vuelve cada vez más roja porque las estrellas azules tienen masas muy superiores y su tiempo de vida es muy corto. Así, la evolución en color será más rápida en B-V que en V-K (Schneider, 2015). Además, hay un mayor número de galaxias azules para redshifts altos que para redshifts bajos en comparación con las galaxias rojas (Butcher & Oemler, 1984).

La distribución de galaxias en cúmulos no es uniforme. Aquellas más masivas, rojas y con formación estelar baja suelen encontrarse en las zonas centrales del cúmulo, a diferencia de las menos masivas y azules, con formación estelar intensa, que se muestran de forma más dispersa y generalmente hacia las zonas exteriores (Nishizawa et al. 1997). Si se representa un diagrama color-magnitud, se encuentra una secuencia prácticamente horizontal denominada secuencia roja (RCS: *red cluster sequence*), debida a la menor metalicidad de las galaxias poco masivas (De Lucia et al. 1997) y la edad (Gallazzi et al. 2006), dominada por las galaxias de los primeros tipos del cúmulo. La secuencia roja resulta de gran importancia para entender la evolución de las galaxias, así como para detectar cúmulos de galaxias. De esta forma, una de las características más destacables de los cúmulos de galaxias es la presencia de un elevado número de galaxias rojas, que se encuentran formando una relación lineal distinguible y relativamente estrecha en el diagrama color-magnitud (p.ej. Stanford et al. 1998), la secuencia roja, observada hasta $z \sim 2$ (Cerulo et al. 2016). Así, se encuentra una agrupación de galaxias con colores similares pero que difieren en magnitud.

La dispersión de las galaxias en la secuencia roja es pequeña, son galaxias muy agrupadas en color, lo que parece indicar que las galaxias de los primeros tipos en un cúmulo presentan colores similares, y las pequeñas diferencias son debidas al cambio en la luminosidad. Además, tanto la secuencia roja como los colores de las galaxias evolucionan con redshift. Para un z determinado, las galaxias con diferentes actividades de formación estelar presentan colores diferentes (Nishizawa et al. 1997).

Resulta importante comentar que los diagramas color-magnitud para cúmulos de galaxias a mismos redshifts presentan secuencias rojas muy parecidas. Sin embargo, si comparamos cúmulos de galaxias a diferentes redshifts, la secuencia roja será más roja para redshifts mayores, debido al propio redshift de las galaxias (Bell et al. 2004). De esta forma, a partir de la secuencia roja, se puede estimar el redshift del cúmulo siempre que presente una buena calibración fotométrica. Así mismo, la precisión en esta medida dependerá de los filtros fotométricos que se empleen para la deducción del color.

1.5. Historia de formación estelar

La formación estelar en una galaxia tiene lugar en un periodo finito de tiempo. En concreto, el ritmo de formación estelar decrece con el tiempo porque cada vez se consume más material en las estrellas, haciendo que no haya material disponible para nuevas estrellas. El modelo estándar de formación de estrellas sugiere un comportamiento exponencial decreciente de la forma (Schneider, 2015):

$$\psi(t) = \tau^{-1} \exp[-(t - t_f)/\tau] H(t - t_f). \quad (1)$$

La distribución espectral de galaxias está determinada por la relación entre el ritmo de formación estelar en la actualidad y en el pasado $\psi(\text{hoy}) / \langle \psi \rangle$.

1.6. Polvo

El polvo presente en el medio interestelar afecta al espectro obtenido, cambiando el color de una población estelar. En concreto, el polvo absorbe la radiación en el ultravioleta y el visible y la re-emite en el infrarrojo (Li & Draine 2001b), atenuando así el espectro en la región del ultravioleta al infrarrojo. La absorción intrínseca del polvo es difícil de tener en cuenta, ya que depende tanto de las propiedades ópticas del polvo como de su distribución geométrica y las estrellas. En particular, en una fase activa de formación estelar, la extinción es muy elevada (Calzetti & Kinney, 1994). El efecto de la extinción varía con la longitud de onda y resulta de gran importancia conocer su dependencia para corregir las observaciones.

2. Proceso de selección del cúmulo objeto de estudio

2.1. CATARSIS

Para el desarrollo de este trabajo, se analiza un cúmulo de galaxias procedente de la muestra CATARSIS (*the Calar Alto “Tetra-ARmed Super-Ifu spectrograph” Survey*).

CATARSIS es un estudio espectroscópico en desarrollo de objetos con magnitudes AB menores a 22.0 mag, que cubrirá un área de 1.7 *grados*² con una resolución espectral de 1000, empleando el instrumento TARSIS¹ (*Tetra-ARmed Super-Ifu spectrograph*). TARSIS es un instrumento seleccionado para su diseño y construcción para el telescopio de 3.5m del CAHA (Centro Astronómico Hispano en Andalucía). Se trata de un espectrógrafo de campo integral (IFS) de resolución intermedia, optimizado para luz azul (320-520 nm) y con un amplio campo de visión.

De esta forma, CATARSIS alcanzará longitudes de onda relativamente poco exploradas, desde los 320 nm hasta los 810 nm, explorando cúmulos de galaxias en el rango comprendido entre $z=0.15$ y $z=0.23$, hasta la región de *infall* y los filamentos que los conectan. Su objetivo es obtener espectros de galaxias con una relación señal/ruido lo suficientemente alta como para llevar a cabo un análisis específico de las galaxias, incluyendo las abundancias estelares y nebulares, sus historias de formación estelar y la dinámica de los cúmulos. Este rango de desplazamiento al rojo permite que los espectros en condiciones de reposo ($\sim 278\text{-}700$ nm) incluyan la región del ultravioleta cercano, H α y [NII], esenciales para el análisis de las poblaciones estelares.

Los datos derivados de este trabajo de fin de grado serán utilizados por el grupo de investigación de CATARSIS. Permitirán optimizar la planificación de futuras observaciones, por ejemplo, los tiempos de exposición necesarios para la observación del cúmulo, o ajustar de forma precisa el diámetro del mismo.

Atendiendo a la riqueza y las propiedades fotométricas de cada cúmulo procedente de la muestra de CATARSIS, se decide escoger para estudio el cúmulo número 32, centrado en las coordenadas (AR, DEC)=(328.4, 17.695), con un radio de 0.13 grados (7.8 minutos de arco) y a un redshift

¹Instrumento TARSIS.

$z=0.23$. Se trata del cúmulo Abell 2390², en la constelación de Pegaso. El interés sobre Abell 2390 es de plena actualidad, el 23 de mayo de 2024, la Agencia Espacial Europea ha publicado una nueva imagen realizada con el telescopio Euclid, en el visible e infrarrojo, que permitirá avanzar en el conocimiento de la materia oscura³.

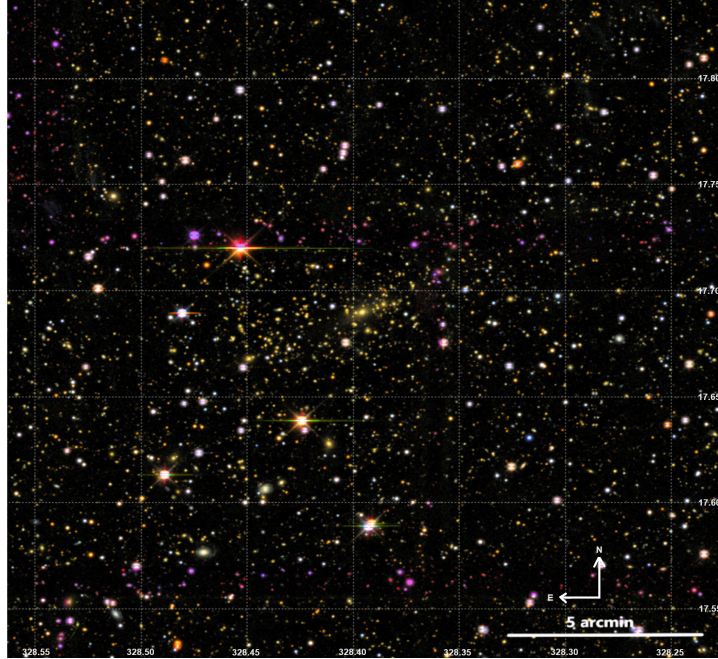


Figura 1: Cúmulo 32 de la muestra de CATARSIS: Abell 2390.

2.2. Datos fotométricos del cúmulo a estudiar

Para el estudio del cúmulo, se emplean los datos fotométricos de dos catálogos diferentes.

Legacy Survey Data Release 10 (DR10)⁴: considera objetos extragalácticos en el óptico y el infrarrojo, colaborando con diferentes proyectos y telescopios para completar sus imágenes tridimensionales, entre los que destacan: Beijing-Arizona Sky Survey (BASS), DECam Legacy Survey (DECaLS) y Mayall z-band Legacy Survey (MzLS). El DR10 incluye observaciones en las bandas fotométricas g,r,i,z así como w1, w2, w3 y w4 procedentes de NEOWISE (*Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer*).

SDSS (Sloan Digital Sky Survey)⁵: se trata de uno de los proyectos de investigación más importantes de la historia de la Astronomía. Emplea un telescopio de 2.5 metros que se encuentra en el Observatorio de Apache Point, en el sureste de Nuevo México. Sus objetivos principales son cartografiar la Vía Láctea, buscar planetas extrasolares y resolver el enigma de la energía oscura. Proporciona información en cinco bandas fotométricas: u,g,r,i,z. Para los filtros de SDSS, el break de 4000Å se encuentra dentro de la banda g siempre que z sea menor a 0.35, como en las galaxias objeto de estudio. La existencia de datos en banda u permite trazar de forma eficiente la SED.

²Abell 2390.

³Noticia de la ESA sobre Abell 2390.

⁴Legacy Survey.

⁵Sloan Digital Sky Survey.

Estos telescopios presentan las siguientes curvas de transmisión:

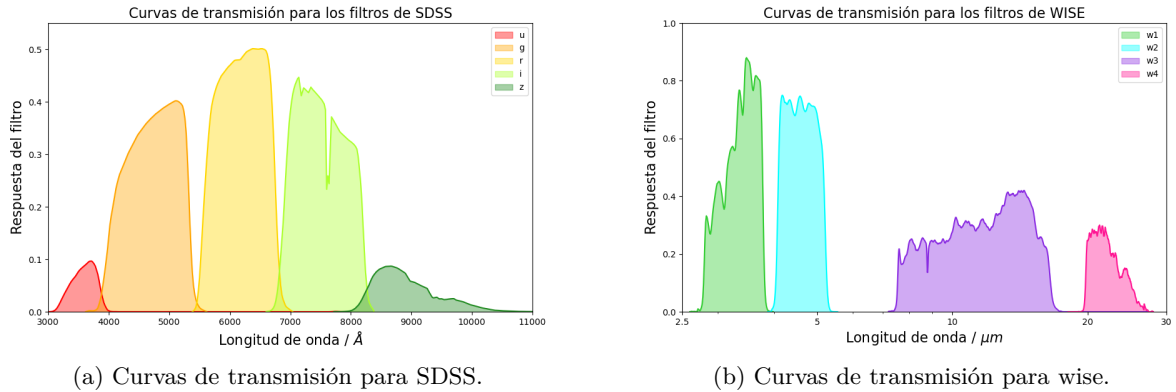


Figura 2: Filtros de SDSS y DR10. Nótese que DR10 comparte los mismos filtros que SDSS.

Gracias a estos catálogos, se obtiene un fichero con los datos relevantes al cúmulo objeto de estudio como la ascensión recta y declinación de cada objeto perteneciente al cúmulo y la magnitud y flujo y sus correspondientes errores, en las distintas bandas fotométricas. Se analizarán por separado los datos pertenecientes únicamente al DR10 o al SDSS, y aquellos objetos comunes a ambos catálogos.

2.3. Principales herramientas

Para el análisis y ajuste de las distribuciones espectrales de energía se emplea la herramienta: **Bagpipes** (*Bayesian Analysis of Galaxies for Physical Inference and Parameter Estimation*)⁶. Se trata de un programa desarrollado en el lenguaje de programación Python que permite recuperar las historias de formación estelar y analizar la distribución de los colores, la tasa de formación estelar, la masa de las galaxias en función de la densidad local (determinada por su distancia proyectada al centro), de las propiedades del cúmulo (masa, tamaño, riqueza) y el redshift de observación. Bagpipes es un código bayesiano de ajuste espectral, diseñado para modelar la emisión de galaxias desde el ultravioleta lejano hasta el microondas, y para ajustar estos modelos a datos espectroscópicos y fotométricos empleando el algoritmo de muestreo MultiNest⁷. Los modelos de SPS implementados en el código son la versión 2016 de los modelos de Bruzual & Charlot (2003)⁸ y se construyen utilizando una función de masa inicial (IMF) de Kroupa (2001)⁹.

Además, se hace uso de **TOPCAT** (*Tool for OPERations on Catalogues And Tables*)¹⁰, un visor gráfico interactivo y editor de datos tabulares. En concreto, la herramienta *Joins* ha permitido crear 3 ficheros diferentes a partir del análisis de los datos. Dos ficheros con objetos que únicamente se encuentran en uno de los dos catálogos, SDSS o DR10, respectivamente, y un tercer fichero con objetos comunes. Además ha permitido realizar cálculos simples de manera sencilla como la corrección de extinción y la distancia angular al centro del cúmulo.

⁶Bagpipes Documentation.

⁷PyMultinest Documentation.

⁸Bruzual & Charlot: Stellar population synthesis at the resolution of 2003.

⁹Pavel Kroupa: On the variation of the Initial Mass Function.

¹⁰TOPCAT Documentation.

3. Análisis de la muestra

3.1. Descripción de los datos

Los datos se han separado en los tres ficheros para conocer el número de galaxias de cada uno, obteniendo 744 galaxias comunes a DR10 y SDSS, 283 pertenecientes únicamente a SDSS y 3121 a DR10. De esta forma, se ve que prácticamente la totalidad de la muestra está contenida en los datos de DR10 (el 93%), pero como ya se ha comentado, la información procedente de la banda u de SDSS será de gran interés para el buen ajuste de la SED.

En los catálogos de SDSS y DR10 se muestra una clasificación de los objetos según sean galaxias o estrellas. El primer paso es seleccionar únicamente los datos relevantes a galaxias, ya que el objetivo de este trabajo es inferir las propiedades de las galaxias pertenecientes al cúmulo.

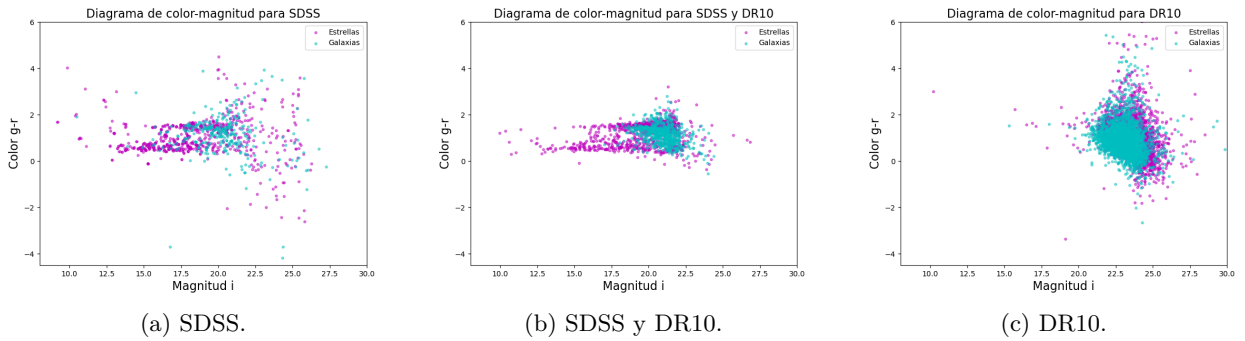


Figura 3: Estrellas y galaxias presentes en los tres ficheros objeto de estudio.

La Figura 3 muestra que los datos pertenecientes a DR10 cubren magnitudes mayores, es decir, objetos más débiles, que no están presentes en SDSS, lo que implica que las observaciones de DR10 son más profundas.

A partir de este punto, se considerarán sólo las galaxias y se expondrán los resultados teniendo en cuenta los tres ficheros de forma conjunta, para obtener un análisis global de todo el cúmulo.

Para el análisis de las SEDs los datos que son relevantes son los flujos en las distintas bandas fotométricas y sus errores. El programa Bagpipes emplea por defecto los flujos fotométricos en μJy , y los flujos que proporcionan tanto DR10 como SDSS se encuentran en nanomaggies. Además únicamente los flujos extraídos con DR10 están corregidos de extinción. De esta forma, se realizan las correspondientes conversiones a los datos originales y se corrige de extinción galáctica.

3.2. Secuencia roja y nube azul

Para comenzar al análisis de los datos fotométricos de Abell 2390, primeramente, se seleccionan aquellas galaxias del cúmulo pertenecientes a la secuencia roja y a la nube azul.

Si se recurre a la literatura, existen diversas definiciones de galaxias azules y rojas, por lo que para este trabajo se va a introducir una definición empírica basada en los datos fotométricos

observados, mostrada en el artículo 16 de la bibliografía (Hao et al. 2010). Así, se definen las galaxias azules como aquellas que se encuentran en el diagrama color-magnitud a más de dos desviaciones estándar de la relación lineal de la secuencia roja y por debajo de ésta en color. Las galaxias de la secuencia roja, cuyos colores están estrechamente agrupados, pueden aproximarse con una distribución gaussiana con un ancho estrecho. Por otro lado, los colores de las galaxias azules no están tan agrupados y pueden aproximarse con una distribución gaussiana, pero con un ancho más amplio (Hao et al. 2010).

En el diagrama color-magnitud, la secuencia roja se caracteriza típicamente por tres factores: su densidad, el punto de intersección y la dispersión (Hao et al. 2010). Algunos estudios sugieren que la dispersión en la secuencia roja está determinada principalmente por efectos de edad, la pendiente por la relación masa-metalicidad, y el punto de intersección por una combinación de diferencias de edad y masa-metalicidad (De Lucia et al. 2007).

La selección de galaxias dentro de la secuencia roja y los errores de medida afectan al cálculo de la pendiente y la dispersión de la secuencia roja, por lo que en el artículo mencionado, se emplea un modelo gaussiano (*ECGMM*, *error-corrected Gaussian Mixture Model*) que permite eliminar los errores de medida y extraer información sobre las propiedades intrínsecas de la secuencia roja. En concreto, consiguen determinar la relación lineal y la dispersión de la secuencia roja para 14000 cúmulos diferentes a redshifts entre 0.1 y 0.3. Se infiere que la dispersión de la línea central de la secuencia roja aumenta ligeramente con el corrimiento al rojo, y que la pendiente disminuye con el corrimiento al rojo. También se observa que la pendiente no depende en gran medida de la riqueza del cúmulo. Además, se obtienen los mismos resultados con datos espectroscópicos, por lo que se deduce que las propiedades de la secuencia roja son independientes del entorno. Como se ha comentado, el break de 4000 Å se encuentra en la banda g, por lo que el color que va a proporcionar mayor información sobre la secuencia roja será g-r.

La relación para la secuencia roja en el diagrama color-magnitud (g-r) frente a i presenta una pendiente negativa (Gladders et al. 1998). En este diagrama, considerando los resultados del artículo, para $z=0.23$ se tiene una pendiente -0.0237 y ordenada en el origen de 1.67943 . Además, se emplea una dispersión $\sigma = 0.065$, que se trata del ancho de la línea de la secuencia roja, dada por el mejor ajuste ECGMM. De esta forma se tiene una caracterización tanto para la secuencia roja como para la nube azul.

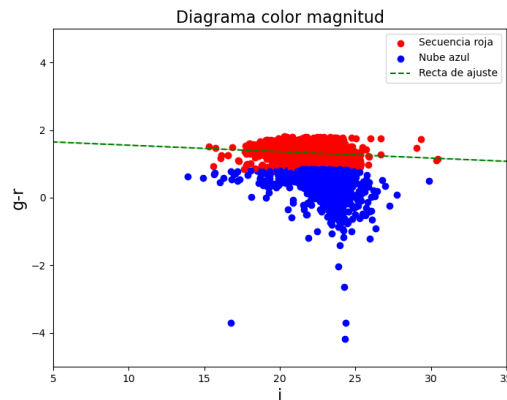


Figura 4: Diagrama color-magnitud para las galaxias objeto de estudio. Secuencia roja y nube azul caracterizada a partir de la recta de ajuste proporcionada por el artículo de referencia.

Para comenzar con el análisis de las galaxias de Abell 2390, se ajustan primero las galaxias más brillantes dentro de la secuencia roja, que son las que proporcionarán resultados más fiables en Bagpipes, al tener mayor flujo y menor contaminación de galaxias de fondo. De esta forma, se hace un corte en la magnitud i de 20 mag para caracterizar la secuencia roja brillante. Después, se estudiarán las galaxias que están por debajo de la relación para la secuencia roja, que forman la nube azul, y aquellas galaxias más débiles de la secuencia roja (secuencia roja débil).

3.3. Distribución espacial de las galaxias

Para comenzar el estudio de la distribución espacial de las galaxias se analizan los ficheros originales, en los que se incluyen galaxias más cercanas y lejanas que $z = 0.23$.

La mayoría de cúmulos muestran una concentración central, con una densidad de galaxias que aumenta hacia el centro, como se aprecia en Abell 2390. Las galaxias rojas se encuentran más concentradas hacia el centro del cúmulo y las galaxias azules dominan en las zonas más externas, por lo que la fracción de galaxias rojas disminuye con el aumento de la distancia desde los centros de los cúmulos. Así, la secuencia roja resulta una evidencia de que las galaxias de los primeros tipos están agrupadas tanto en el diagrama de color como en el espacio. Este comportamiento, como se muestra a continuación, es más evidente para las galaxias de la secuencia roja brillante (Figura 5a).

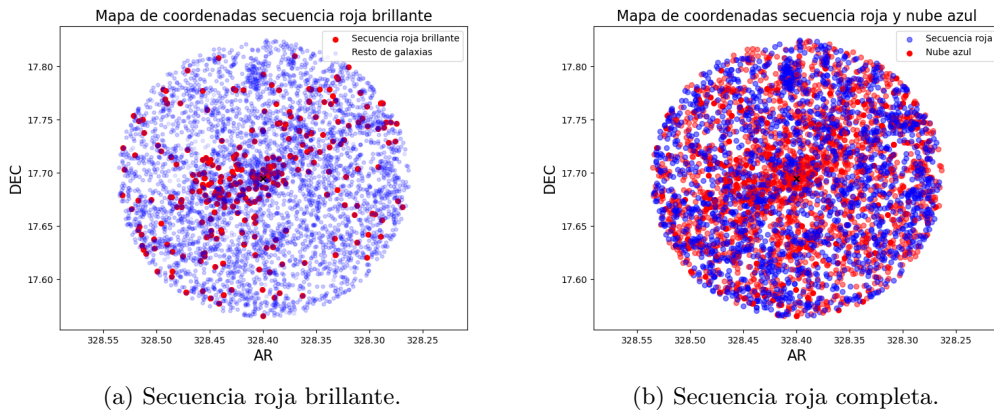


Figura 5: Mapa de coordenadas donde se distinguen las galaxias de la secuencia roja brillante (a) y la secuencia roja completa (b) con la nube azul. Se muestra el centro del cúmulo con una cruz.

En estas figuras, atendiendo a la densidad espacial, se aprecia la presencia de un grupo dentro del cúmulo, en la zona superior central, formado principalmente por galaxias de la nube azul y la secuencia roja débil, que será analizado en las siguientes secciones.

Por último, con los resultados proporcionados por Bagpipes para el redshift, se seleccionarán aquellas galaxias con un redshift similar al del cúmulo. Se imponen varias condiciones para considerar que una galaxia pertenece al cúmulo. Primero se excluyen aquellos objetos con errores demasiado elevados, por encima de 0.4 en z . Además se consideran las galaxias que sean compatibles con el rango $0.21 < z < 0.25$, multiplicando previamente el error por la izquierda por 1.2 y el error por la derecha por 1.5, ya que la obtención del desplazamiento al rojo por Bagpipes no es un problema lineal, y se ha visto que de esta manera se caracterizan bien de forma gráfica las galaxias del cúmulo

atendiendo principalmente al criterio de densidad. A modo de ilustración, se muestra el resultado para galaxias de la secuencia roja débil:

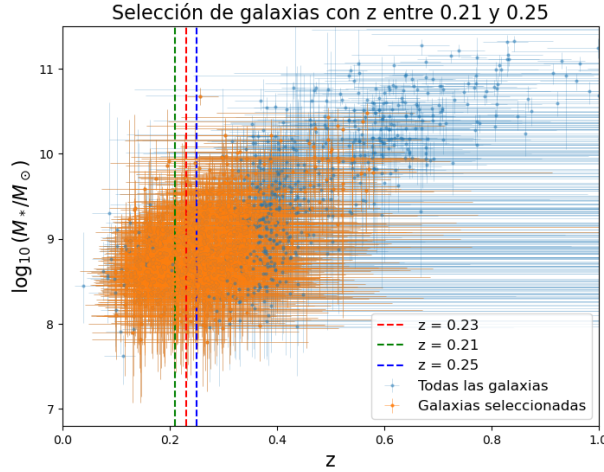


Figura 6: Selección de galaxias consideradas del cúmulo a partir de los criterios establecidos para el corrimiento al rojo obtenido con Bagpipes.

Se aprecian barras de error bastante grandes en los datos originales y una saturación en torno al z del cúmulo, como era esperable. A partir de estas galaxias consideradas del cúmulo, se volverá a correr Bagpipes para obtener las propiedades relevantes como la masa estelar o la edad y se analizarán los resultados. Además, se volverán a filtrar según su error, con el objetivo de no introducir datos que no sean precisos.

Por último, se estudiará el tipo morfológico que se asigna en el catálogo fotométrico DR10 a cada galaxia para comparar los resultados. Esta información sólo está disponible para los objetos pertenecientes al catálogo de DR10, pero como la mayor parte de la muestra está incluida en este catálogo, se reconoce como una medida fiable. Aquellas galaxias clasificadas como DEV corresponden a un perfil de de Vacoulers, con un índice de Sersic $n > 2.5$, lo que indica galaxias de tipo elíptico o lenticular. En cambio, aquellas clasificadas como EXP o REX indican galaxias de los últimos tipos, espirales e irregulares, por tener un índice de Sersic $n < 2.5$. Las clasificadas como SER no presentan un perfil concreto de la luminosidad de la galaxia con la distancia al centro, se refieren a un índice de Sersic que puede estar entre 1 y 4.

4. Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para todas las galaxias, y posteriormente, se realiza un análisis más detallado para las galaxias consideradas del cúmulo a partir del desplazamiento al rojo deducido por Bagpipes.

Bagpipes proporciona diferentes gráficas para todas las galaxias, que muestran cómo ajusta los modelos de la distribución espectral de energía y las distintas propiedades que deduce. Éstas han sido de gran importancia para interpretar la precisión y la posible degeneración de los parámetros.

Se muestra a continuación el resultado para una galaxia perteneciente a la secuencia roja, con coordenadas $(AR, DEC)=(328.3895, 17.6994)$ (Figuras 7, 8, 9 y 10).

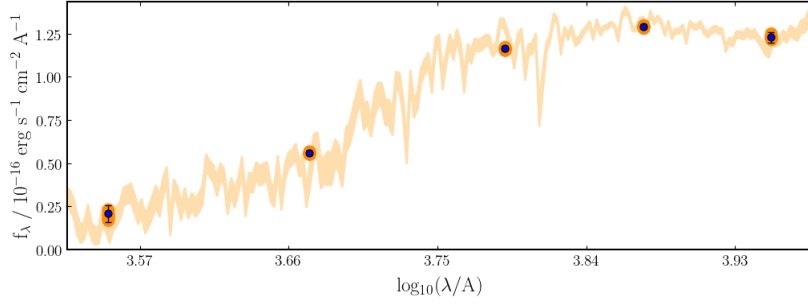


Figura 7: Distribución espectral de energía para una galaxia de la secuencia roja.

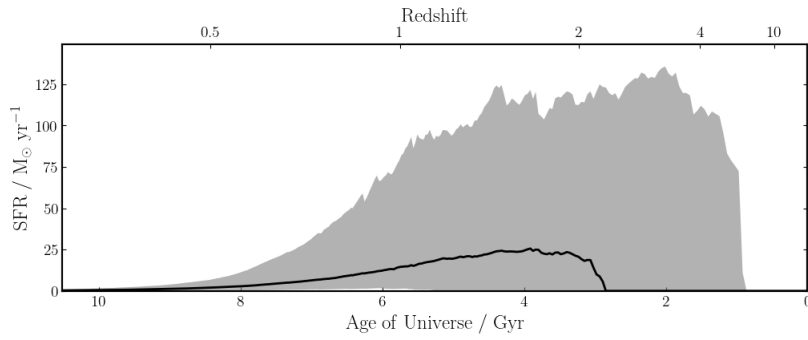


Figura 8: Mejor ajuste de la historia de formación estelar para una galaxia de la secuencia roja. Se muestra la tasa de formación estelar como una función de la edad del universo.

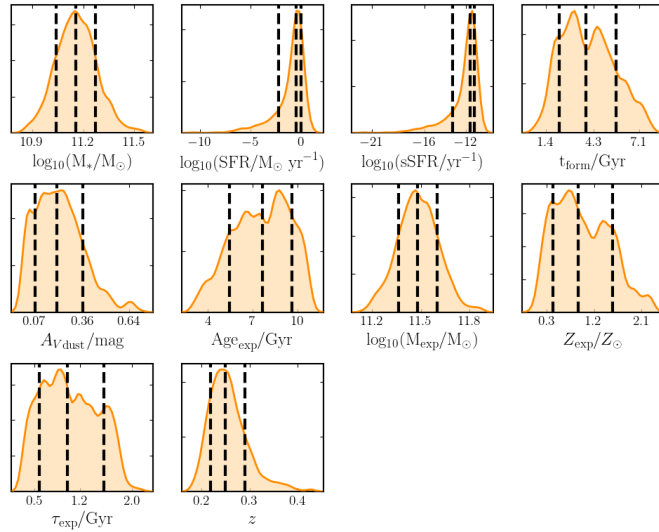


Figura 9: Proyecciones en una dimensión de las propiedades fundamentales de una galaxia de la secuencia roja.

¹⁰Nota: Las gráficas generadas mediante el uso de Bagpipes se encuentran en inglés debido a que el código no permite modificaciones en este aspecto.

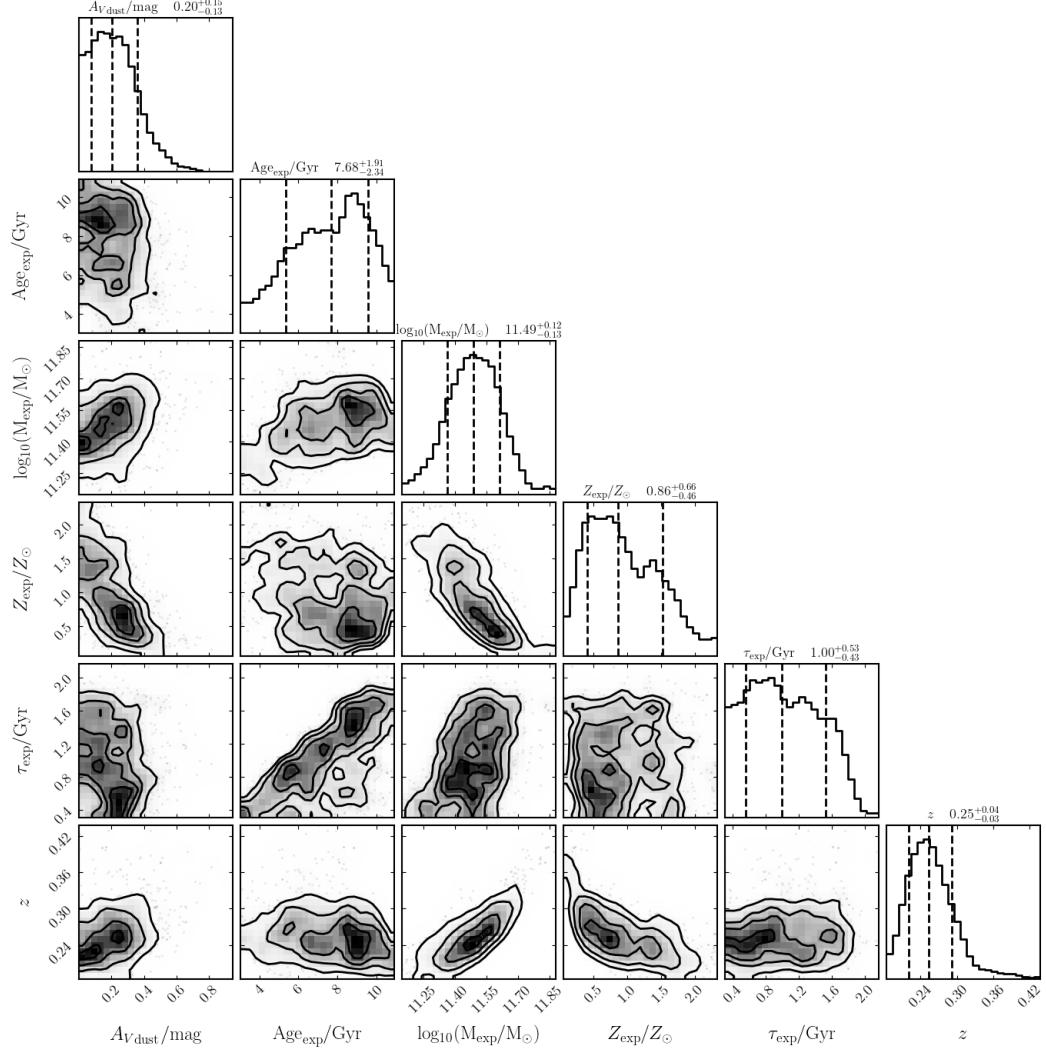


Figura 10: Proyecciones en una y dos dimensiones de la distribución de todos los parámetros ajustados por el modelo de Bagpipes para una galaxia de la secuencia roja.

En esta figura se muestra la distribución de probabilidad de cada parámetro obtenido por Bagpipes. Los parámetros con un único pico en la gaussiana indican mejores estimaciones, sin embargo, la existencia de distribuciones bimodales denotan una degeneración. En este caso, se aprecian las degeneraciones existentes con el redshift, principalmente en la masa estelar. Además, se incluyen los percentiles del 16, 50 y 84%.

4.1. Selección de galaxias por z fotométrico

Se comienza el análisis con los datos de todas las galaxias obtenidos con Bagpipes, teniendo en cuenta la secuencia roja y nube azul. Se hace un diagrama de la masa estelar frente al desplazamiento al rojo y la edad frente a la masa. Se distinguen aquellos objetos con $z > 0.5$ con cruces, ya que se trata principalmente de las galaxias que no se van a considerar como pertenecientes al cúmulo, es decir, galaxias de fondo.

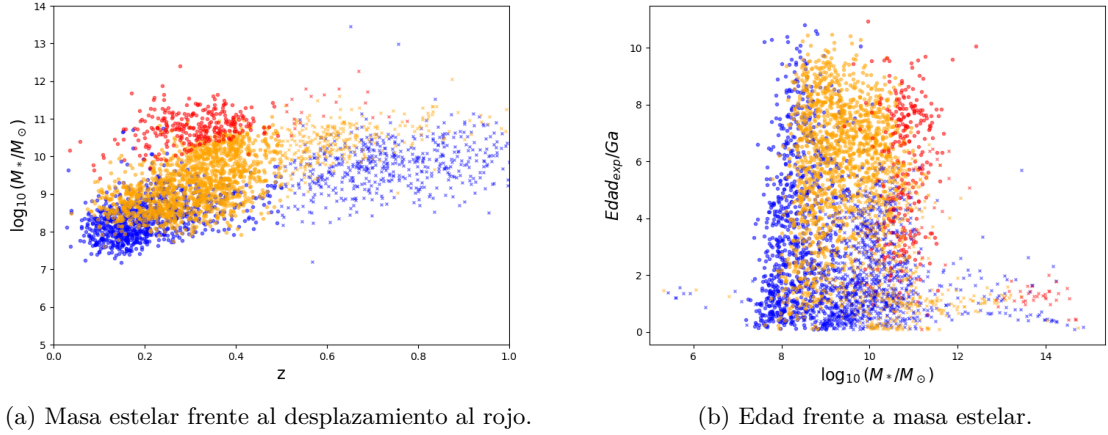


Figura 11: Propiedades derivadas de las galaxias.

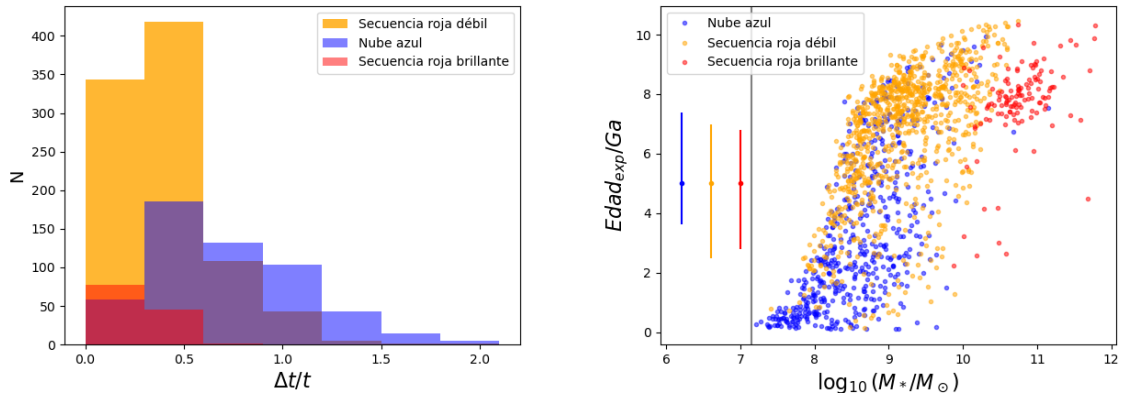
Atendiendo al desplazamiento al rojo (Figura 11a), se aprecia una mayor abundancia de galaxias azules de fondo ($z > 0.5$). Se trata de galaxias de campo, principalmente con masas superiores a la nube azul del cúmulo. Las galaxias rojas probablemente se encuentren ligeramente desplazadas hacia valores de z más altos que los que presentan realmente. Esto es así ya que el color rojo puede deberse únicamente a las propiedades intrínsecas de las estrellas que las componen, pero, al corregir de extinción, sistemáticamente se derivan colores más rojos.

En cuanto a la masa y la edad (Figura 11b), se muestra que las galaxias con mayor cantidad de masa se encuentran en la secuencia roja brillante y va disminuyendo la masa al pasar a la secuencia roja débil y la nube azul. Además, se ve que el rango de masas se encuentra principalmente entre 10^8 y $10^{12} M_\odot$ y el rango de edades entre 0 y 10 gigaaños.

4.2. Propiedades físicas de las galaxias de Abell 2390

Se estudian a continuación los resultados obtenidos para las galaxias consideradas del cúmulo teniendo en cuenta la secuencia roja y nube azul.

Con el propósito de que el análisis de los resultados sea más preciso, se estudia el error de la edad entre la edad en un histograma, para evaluar los errores relativos en las medidas. A partir de la Figura 12a, se descartan aquellos resultados superiores a 1.5 para el estudio de las propiedades. Se aprecia que las galaxias con mayores errores se encuentran en la nube azul. Esto es debido a que al presentar edades menores, un error grande implica errores relativos mayores, a pesar de que, en términos absolutos, en comparación con la secuencia roja, no sean tan significativos. Además, se hace un diagrama de la edad frente a la masa (Figura 12b), donde se aprecia que, una vez escogido el desplazamiento al rojo del cúmulo, el rango de masas se encuentra entre 10^7 y $10^{12} M_\odot$.



(a) Histograma para el error de la edad entre la edad. (b) Edad frente a masa estelar. Se muestran los errores típicos para cada color a la izquierda.

Figura 12: Estudio y selección de las galaxias del cúmulo según su error.

A continuación se exponen diferentes gráficas que muestran los resultados de las propiedades derivadas a partir de la fotometría de las galaxias del cúmulo, tras seleccionar z y los errores máximos permitidos para las galaxias de la secuencia roja y la nube azul. Asimismo, se incluyen los resultados más relevantes en función del tipo morfológico.

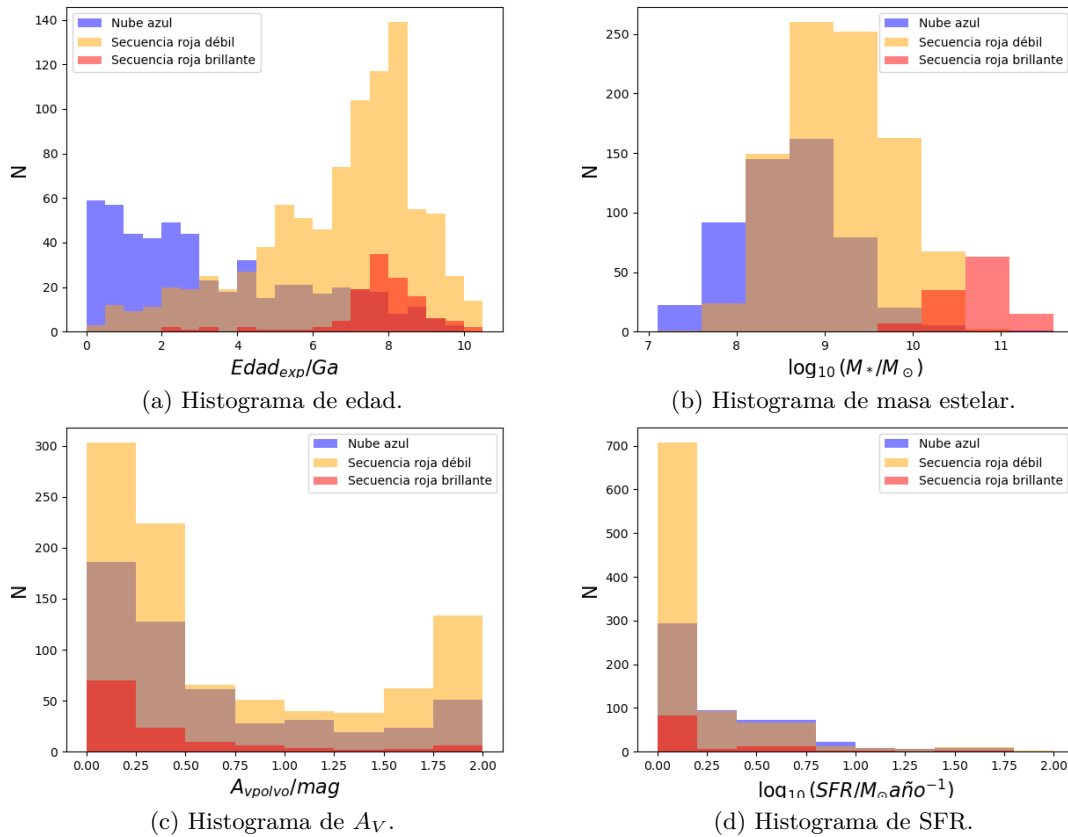
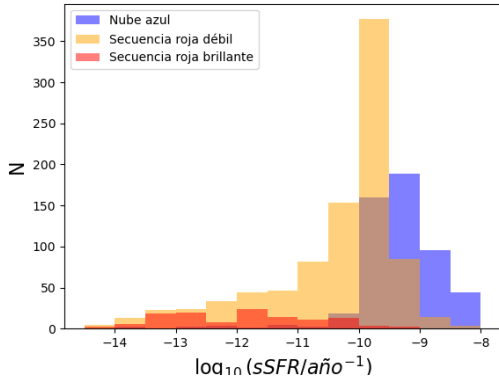
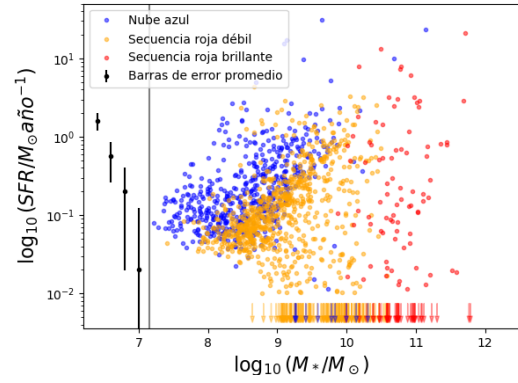


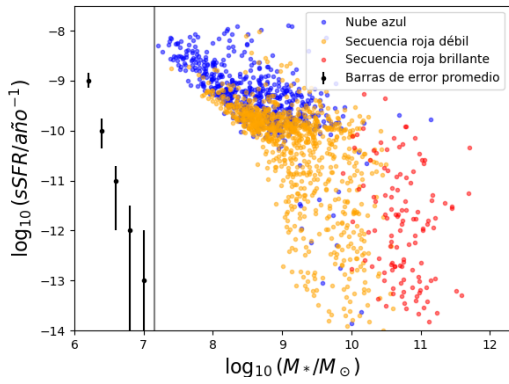
Figura 13: Propiedades derivadas para las galaxias de Abell 2390. El color marrón corresponde a la superposición de galaxias de la secuencia roja débil (naranja) y la nube azul (azul).



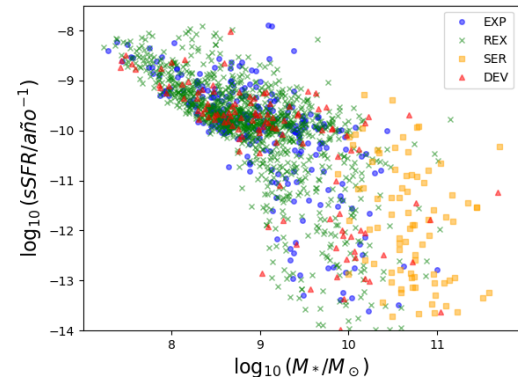
(e) Histograma de sSFR.



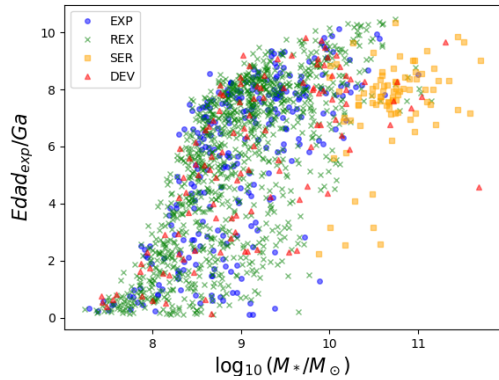
(f) SFR frente a masa estelar. Las flechas representan galaxias con SFR menores a $10^{-2} M_{\odot} \text{año}^{-1}$.



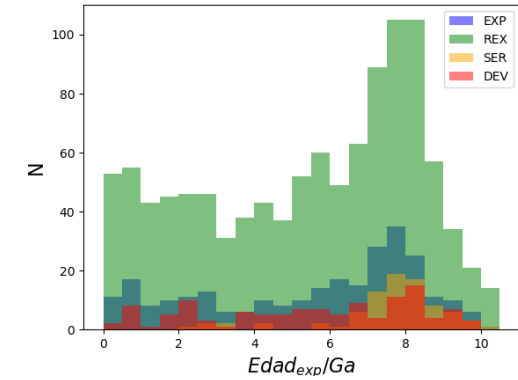
(g) sSFR frente a masa estelar.



(h) sSFR frente a masa estelar según el tipo morfológico.



(i) Edad frente a masa estelar según el tipo morfológico.



(j) Histograma de edad según el tipo morfológico.

Figura 13: Propiedades derivadas para las galaxias de Abell 2390 (Continuación).

En estas figuras se aprecia la estrecha relación existente entre la masa, la edad y la tasa de formación estelar (SFR). Se distingue una caída pronunciada en la tasa de formación específica (sSFR) con la masa, con valores mayores para la nube azul que van decreciendo hasta la secuencia roja brillante. Además, los errores promedio de la SFR varían de $0.06 M_{\odot}/\text{año}$ cuando la SFR es alta a más de $0.5 M_{\odot}/\text{año}$ cuando es baja, por lo que los valores de SFR menores a $0.01 M_{\odot}/\text{año}$ son muy inciertos. Analizando la Figura 13 de forma global, las galaxias más viejas son las de la

secuencia roja brillante, que cubre el rango de masas más alto (entre $10^{9,5}$ y $10^{11,5} M_{\odot}$). Al estar formadas por estrellas viejas, la tasa de formación estelar se encuentra en el rango más bajo, igual que ocurre con la sSFR. En cambio, las galaxias de la nube azul tienen tasas de formación estelar más elevadas, son más jóvenes y menos masivas. Las galaxias de la secuencia roja débil presentan características intermedias, edades elevadas, masas inferiores a la secuencia roja brillante y tasas de formación estelar específica cercanas a la nube azul. En cuanto al polvo, se ve que las galaxias rojas son las menos afectadas por extinción, esto se debe a la presencia de menor cantidad de polvo y gas. Las galaxias de la nube azul contienen más polvo, y por lo tanto, el valor de A_v será mayor. Por último, comparando estos resultados con las Figuras 13h-13j, se deduce la correspondencia entre el color de las galaxias y el tipo morfológico. De forma general, la secuencia roja son galaxias de tipo SER y DEV; y la nube azul EXP. El tipo REX se trata principalmente de galaxias pertenecientes a la secuencia roja débil y en menor medida a la nube azul.

4.3. Distribución de las galaxias de Abell 2390

Si se comparan los resultados inferidos de la clasificación en secuencia roja y nube azul con los tipos morfológicos proporcionados por el catálogo, se observa el siguiente comportamiento del número de galaxias con la distancia al centro del cúmulo:

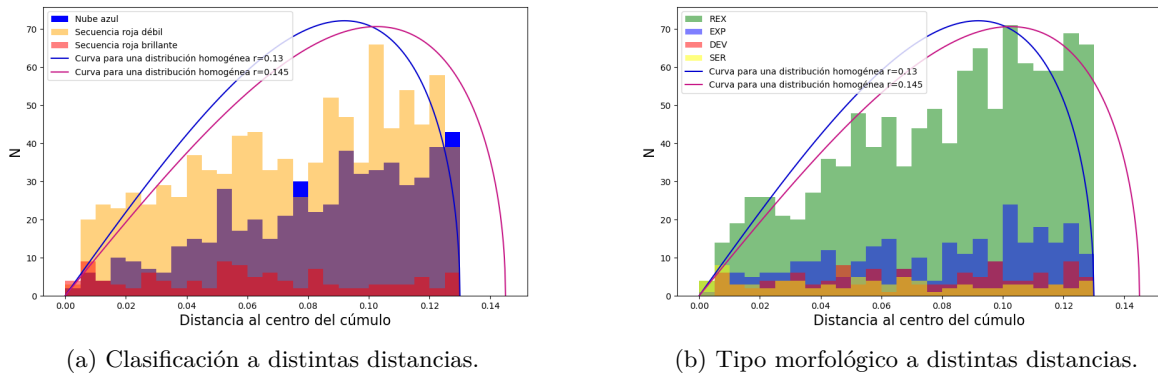


Figura 14: Comparación de la distribución de galaxias con la distancia al centro del cúmulo según la separación entre secuencia roja y nube azul (a) y la clasificación morfológica (b) y según el comportamiento para una distribución homogénea de galaxias en 3D.

Se ha tenido en cuenta que si se representa una distribución en 3D homogénea, la distribución en el cielo en 2D no lo será. El número de galaxias sigue la forma: $\frac{dN}{dR} = 4\pi\rho R\sqrt{r^2 - R^2}$, donde R es la distancia proyectada y r es el radio del cúmulo donde la densidad volumétrica, ρ , se puede suponer homogénea. Estas son las curvas dibujadas en la Figura 14 en azul y rosa y se tratan, por tanto, de la forma que seguiría el histograma si la distribución de galaxias fuese uniforme, según si se considera el radio estudiado para Abell 2390 ($r=0.130$ grados) o $r=0.145$ grados, respectivamente. La curva rosa sigue la tendencia de caída del número de galaxias hacia las zonas más externas del cúmulo. De esta forma, se aprecia que la secuencia roja débil, la nube azul y las galaxias de tipo REX y en menor medida EXP, se distribuyen homogéneamente en el cúmulo, mientras que las galaxias de la secuencia roja y de tipo DEV y SER son más abundantes en el centro, como era esperable, ya que la masa bariónica sigue, en primer orden, un perfil de tipo NFW (Navarro, Frenk, & White, 1995).

A continuación se muestran dos mapas de coordenadas, el segundo (Figura 15b) distingue las

tres galaxias más masivas del cúmulo ($M_* > 10^{11} M_\odot$), que como era esperable, se encuentran en la zona central, en el pozo de potencial.

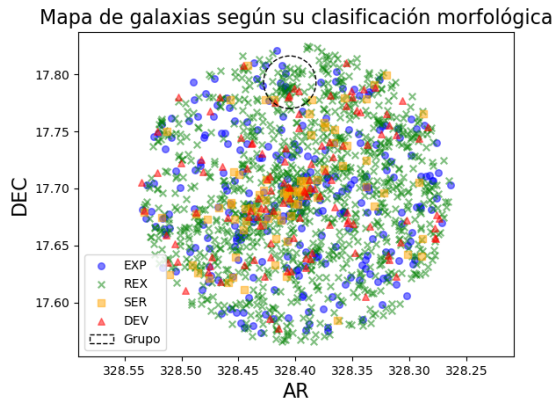
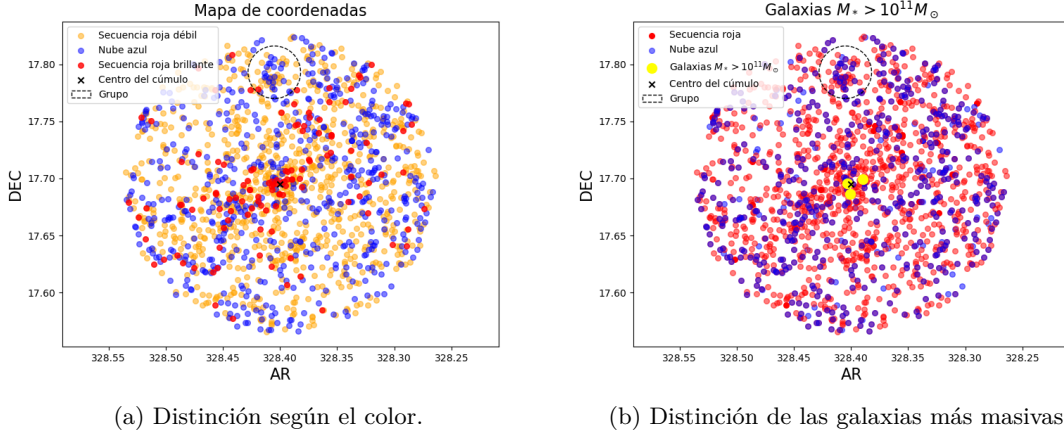


Figura 15: Mapas de coordenadas.

La distribución de colores en la población de la galaxia es muy similar a lo observado en cúmulos relajados a z bajos. Se encuentra una alta concentración de galaxias rojas en el centro del cúmulo y una fracción de galaxias azules que se incrementa como función del radio. Además atendiendo a la densidad en el mapa de coordenadas se ha detectado un pequeño grupo de galaxias en la zona norte, que se mantiene al seleccionar únicamente las galaxias pertenecientes a Abell 2390. Esto indica que este grupo está entrando al cúmulo y presenta interacción con él. Su composición es principalmente de galaxias de la secuencia roja débil, pero también presenta algunas azules.

Teniendo en cuenta la distribución de los tipos morfológicos proporcionados por el catálogo fotométrico DR10, existe una mayor proporción de galaxias elípticas y lenticulares en el centro del cúmulo y, a medida que nos alejamos, se incrementa el número de galaxias de los últimos tipos. Esto concuerda con lo deducido a partir de Bagpipes, las galaxias de la secuencia roja serán elípticas o lenticulares, y las de la nube azul espirales. Esta segregación del tipo morfológico de galaxias se conoce como la relación morfología densidad, que establece que, la fracción de galaxias elípticas y lenticulares con respecto a las espirales aumenta con el incremento de la densidad espacial de galaxias. Además, analizando las masas, las Figuras 15b y 1, sabemos que hay una galaxia cD gigante en el centro del cúmulo. Como se ha comentado anteriormente, también se debe considerar una característica propia de los cúmulos de galaxias, el efecto Butcher-Oemler (1984). Según este

efecto, los cúmulos de galaxias ricos más lejanos presentan un exceso de galaxias con formación estelar y distorsionadas respecto a los cúmulos similares cercanos.

5. Conclusiones

Se ha observado una clara distinción en color y morfología entre las galaxias del cúmulo. La mayor parte de las galaxias azules se encuentran en las zonas más distantes, mientras que las galaxias rojas, con poblaciones estelares envejecidas, se encuentran en el centro, en una zona de mayor densidad. Así, la edad media de la población estelar de las galaxias se hace cada vez menor según se aumenta la distancia al centro, lo que sugiere que el cúmulo está incorporando objetos.

Como era de esperar, las galaxias de la secuencia roja se corresponden con galaxias de los primeros tipos, elípticas y lenticulares situadas en el centro del cúmulo, con tasas de formación estelar específicas muy bajas. Estos objetos son probablemente la primera generación de galaxias formadas en el protocúmulo, que han perdido todo su gas con el paso del tiempo y, por interacción con el resto de galaxias, están formadas principalmente por estrellas viejas, que emiten una gran cantidad de su luz en el óptico y el infrarrojo. En contraposición, las galaxias de la nube azul son galaxias de los últimos tipos, espirales o irregulares que se encuentran en las zonas más distantes y con tasas de formación estelar específica mayores. Además se ha localizado un grupo en la zona norte del cúmulo, formado por galaxias rojas y azules, que está en interacción con él.

Asimismo, las galaxias de los últimos tipos pueden pasar a ser de los primeros tipos por interacciones o colisiones que alteren su estructura. Las galaxias de disco pueden transformarse en esferoidales debido a los impactos de marea producidos al entrar en el potencial gravitatorio del cúmulo (Farouki & Shapiro, 1981) o perder su gas, reduciendo significativamente su tasa de formación estelar, lo que conlleva a un enrojecimiento del color (Martig et al. 2009). De esta forma, resulta relevante el papel del crecimiento jerárquico de las galaxias, especialmente las que han estado presentes en el cúmulo durante períodos prolongados, como las de la secuencia roja brillante, que han interactuado con otras galaxias y el medio intracumular, aumentando su masa estelar, modificando así su morfología y color. No obstante, las galaxias que ingresan al cúmulo pueden encontrarse inicialmente en un estado avanzado de evolución, y haber experimentado transformaciones significativas antes de entrar al cúmulo, exhibiendo características típicas de galaxias rojas.

En conclusión, este trabajo ha permitido inferir las propiedades de las galaxias en cúmulos a desplazamientos al rojo intermedios, a partir de la distribución espectral de energía de sus galaxias. Además, se ha comprobado que la selección de galaxias en la secuencia roja y la nube azul coincide con galaxias de los primeros y últimos tipos respectivamente. Se ha analizado la masa y edad típica de las galaxias del cúmulo, así como su tasa de formación estelar y la extinción del polvo, y se ha deducido la relación morfología densidad característica de los cúmulos.

6. Agradecimientos

Los datos empleados en este estudio derivan de Legacy Survey y SDSS. Asimismo, se reconoce el uso del software especializado TOPCAT y Bagpipes. Por ello, se agradece la contribución de estas entidades y recursos que han resultado esenciales para el procesamiento de los datos. Por último, se agradece enormemente a Armando Gil de Paz por su orientación y apoyo en este trabajo.

7. Bibliografia

- Abraham, R. G., et al., 1996. ApJ, [471](#), [694](#).
- Bell, E. F., Wolf, C., Meisenheimer, K., et al., 2003. ApJ, [608](#), [752-767](#).
- Binney, J., & Tremaine, S., 1987, [86-43129](#).
- Bond, J. R., Kofman, L., & Pogosyan, D., 1995. SSBM, [380](#), [603-606](#).
- Bruzual, G., & Charlot, S., 2003. MNRAS, [344](#), [1000-1028](#).
- Butcher, H., & Oemler, A., J., 1984, ApJ, [285](#), [426](#).
- Calzetti, D., Kinney, A. L., Storchi-Bergmann, T., 1994, ApJ, [429](#), [582](#).
- Carnall, A. C., et al., 2018, MNRAS, [480](#), [4379-4401](#).
- CATARSIS, <https://guaix.ucm.es/catarsis>.
- Cerulo, P., et al., 2016, MNRAS, [457](#), [2209](#).
- Conroy, C., 2013. ArAS, [51](#), [393-455](#).
- De Lucia, G., et al., 2007. MNRAS, [374](#), [809](#).
- Farouki, R. T., & Shapiro, S. L., 1981, ApJ, [243](#), [32-41](#).
- Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, J., White, S. D. M., 2006. MNRAS, [370](#), [1106](#).
- Gladders, M. D., Yee, H. K. C., Majumdar, S., Barrientos, L. F., et al., 2007. ApJ, [655](#), [128](#).
- Hao, J., et al., 2010. ApJ, [702](#), [745-758](#).
- Kollmeier, J., et al., 2019. BAAS, [51\(7\)](#), [274](#).
- Li, A., & Draine, B. T., 2000. ApJ, [554](#), [778-802](#).
- Maraston, C., 2005. MNRAS, [362](#), [799](#).
- Martig, M., Bournaud, F., Teyssier, R., & Dekel, A., 2009. ApJ, [707](#), [250-267](#).
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., White, S. D. M., 1996. ApJ, [462](#), [563](#).
- Nishizawa, A. J., et al., 2014. PASJ, [00\(0\)](#), [1-14](#).
- Rykoff, E. S., et al., 2014. ApJ, [785](#), [104](#).
- Schneider, P., 2006. *Extragalactic Astronomy & Cosmology: An Introduction*. Springer.
- Taylor, M. B., 2005. ASP, [347](#), [29](#).
- Walcher, J., Groves, B., Budavári, T., Dale, D., 2010. Ap&SS, [331](#), [1](#).