

Formación estelar y evolución de una sobredensidad de galaxias a redshift 2.8

Daniel Chinga

15 de diciembre de 2023

ACKNOWLEDGEMENTS

Este proyecto de investigación es el trabajo final de una larga carrera y grandes desafíos académicos que me siento orgulloso de haber logrado gracias a grandes personas que me ayudaron en este camino a lograr mi meta de convertirme en un licenciado en astronomía. Agradecido principalmente de los profesores que imparten asignaturas de astronomía en la carrera, forjando de manera íntegra a grandes profesionales y transmitiendo de la mejor forma los valores de la carrera. Gracias a la directora de carrera y mi profesora Isabelle Gavignaud por su buena disposición y compromiso con sus estudiantes, además de una gran paciencia a la hora de enseñar. Gracias a Lorenzo Monaco y Giuliano Pignata por su experiencia y sabiduría en astronomía estelar. Gracias a Claudio Caceres por su vocación y enseñanzas astronómicas. Agradezco de gran manera por ser mi profesor a Matías Gómez por su gran disposición al momento de enseñar y responder preguntas, además por su destacable simpatía y cercanía con los estudiantes. Agradezco destacablemente a Laurent Chemin por su sabiduría y su gran simpatía, además de su innata habilidad para responder preguntas con mucha rapidez en cualquier ámbito de la astronomía, sin duda tiene un gran talento, me ayudó bastante en mi aprendizaje personal.

Gracias a mi profesora guía Lucia Guaita por su gran apoyo y ayuda incondicional en el desarrollo de este proyecto de investigación, es una gran persona y una excelente docente con una incansable ganas de enseñar, estoy muy agradecido de sus enseñanzas en esta tesis, sin duda me transmitía una gran motivación para lograr este desafío, estoy seguro que es un gran aporte en la astronomía y que formará a muchos estudiantes de la mejor manera.

Agradezco a las personas más importantes en mi vida, mi familia, gracias a ellos esto no hubiera podido ser posible y sin su ayuda no hubiera podido lograr ninguna de mis metas propuestas durante la carrera. Los estudios presentan grandes dificultades y debido a esto mi familia ha sido un gran soporte tanto económico como emocional, estoy feliz de contar con personas maravillosas a mi lado, disfruto todos los días de ellos, por mi parte espero lo mejor para ellos me siento afortunado de que siempre me motiven a seguir adelante. Gracias A.A. y F.C. por ser mi familia, los quiero mucho.

Quiero agradecer también a un gran amigo M.T. que conocí durante la carrera que me ayudo mucho desinteresadamente y en momentos que no fueron muy buenos para mí, fue un gran soporte emocional y académico en momentos difíciles, te quiero mucho.

Por último agradezco también a todas las personas que se dedican a la ciencia, sin ellos nunca me hubiera decidido por empezar una carrera científica, además agradeciendo a todas las personas que componen el instituto de astrofísica de la Universidad Andrés Bello por su labor y dedicación en la ciencia.

ABSTRACT

Contexto: Los estudios profundos actuales a múltiples longitudes de onda permiten establecer protocúmulos a altos redshift mediante simulaciones numéricas, el estudio de estos protocúmulos es importante para entender su evolución y de como llegan a convertirse en un cúmulo a redshift 0, estudios muestran que esta evolución podría ser muy diferente según los parámetros físicos como la masa, volumen y formación estelar de cada protocúmulo, además de su entorno circundante.

Objetivo: Gracias a la definición de protocúmulos de estudios preexistentes, nos enfocamos en una sobredensidad en el campo (CDFS) que podría ser un protocúmulo, el objetivo es analizar la sobredensidad detalladamente, analizando tanto sus características fotométricas e espectroscópicas de la sobredensidad y su entorno a $z=2.8$, comparándola con otras estructuras.

Método: A través de la obtención de datos tanto de galaxias miembros de la sobredensidad como del entorno circundante con los parámetros de VANDELS con información fotométrica y espectroscópica, también a través de otras literaturas que permitan enriquecer la muestra se realizarán comparaciones con otras estructuras que permitan establecer conclusiones y diferentes análisis.

Resultados: La sobredensidad a $z=2.8$ posee una activa formación estelar comparada con otras estructuras, muestra clara relación entre sus miembros en conjunto muestran datos tanto de masa, formación estelar, color y tau muy similares que podrían ser característicos de la sobredensidad a redshift $z \sim 3$.

Conclusiones: Las galaxias miembros de esta sobredensidad tienen valores muy característicos de galaxias activas a estos redshift diferenciándose mucho de estructuras a otros redshift, poseen formaciones estelares muy similares entre galaxias mostrando cierto peak de formación estelar en conjunto entre miembros y galaxias de campo, un análisis de Σ_{SFR} podría darle un enfoque un poco diferente a esta interpretación, además se identificó una cercanía con otras sobredensidades de galaxias con emisión de Lyman alfa que podrían ser parte de la sobredensidad a $z=2.8$, en otro ámbito la sobredensidad a $z=2.8$ según simulaciones podría convertirse en un cúmulo tipo Fornax.

Índice general

1. Introducción	4
2. Conjunto de datos	7
2.1. Datos de VANDELS	7
2.1.1. Datos espectroscópicos de la literatura	8
2.2. Datos de GOGREEN	8
2.3. Datos y observaciones de Zheng 2016	8
3. Análisis y propiedades sobredensidad $z=2.8$	10
3.1. Identificación de la sobredensidad	10
3.2. Caracterización de la sobredensidad	11
3.2.1. Masa total y volumen de la sobredensidad 2.8	12
3.3. Características de la sobredensidad $z=2.8$	14
4. Comparaciones con otras estructuras a diferentes redshift	19
4.1. Comparación de colores U-V vs V-J	20
4.2. Comparación de sSFR vs Masa	25
4.3. Comparación de Age/Tau vs sSFR	31
4.4. Comparación de densidad superficial de tasa de formación estelar vs masa estelar	34
5. Análisis de las sobredensidades lyman alfa	38
6. Evolución y SFRD de la sobredensidad a $z=2.8$	42
6.1. Evolución de la sobredensidad a $z=2.8$	42
6.2. SFRD de la sobredensidad a $z=2.8$	43
7. Conclusión	46

Índice de figuras

3.1.	Histograma de redshift de los miembros	15
3.2.	Histograma de redshift de los miembros y el campo	16
3.3.	Distribución en área de observación con densidad asociada	17
3.4.	Distribución en el área de observación con respecto a la tasa de formación estelar	18
4.1.	Gráfico $(U-V)_{rest-frame}$ vs $(V-J)_{rest-frame}$ de las galaxias de los cúmulos de GOGREEN	22
4.2.	Gráfico $(U-V)_{rest-frame}$ vs $(V-J)_{rest-frame}$ de las galaxias de las sobredensidades de VANDELS	23
4.3.	Gráfico $(U-V)_{rest-frame}$ vs $(V-J)_{rest-frame}$ de las medias de todas las galaxias de las sobredensidades y de los cúmulos	24
4.4.	Gráfico de distribución espacial vs sSFR de las galaxias de la sobredensidad a $z=2.8$	25
4.5.	Hisgramas de sSFR(s) sobredensidades, cúmulos y campo.	26
4.6.	Gráfico de sSFR vs Masa de la sobredensidades 2.8 y su campo	28
4.7.	Gráfico de sSFR vs Masa de la sobredensidades y cúmulos	29
4.8.	Gráfico de Age/Tau vs sSFR de la sobredensidades 2.8 y su campo	31
4.9.	Gráfico de Age/Tau vs sSFR de la sobredensidades a $z=2.8$, $z=3.1$ y los cúmulos a $z=1.034$, $z=1.388$	33
4.10.	Gráfico de Σ_{SFR} vs M^* de la sobredensidades a $z=2.8$ y su campo	35
4.11.	Gráfico de $\log(SFR)$ vs M^* de la sobredensidades a $z=2.8$ y su campo	37
5.1.	Gráfico los miembros sobredensidades $z=2.8$ y LAE de NB466 con peso espacial	40
5.2.	Gráfico los miembros sobredensidades $z=2.8$ y LAE de NB470 con peso espacial	41
6.1.	Gráfico de Masa total vs redshift de sobredensidades simuladas	43
6.2.	Gráfico de SFRD vs redshift de la sobredensidades simuladas	44

Índice de cuadros

3.1. Resumen de las propiedades	14
4.1. Integrantes de la sobredensidad $z=2.8$ y el campo	19
4.2. Integrantes de la sobredensidad $z=3.1$ y el campo	20
4.3. Integrantes del cúmulo $z=1.034$ y el campo	20
4.4. Integrantes del cúmulo $z=1.388$ y el campo	20
4.5. Integrantes de Sobredensidad $z=2.8$ y el campo con HLR	34
5.1. Galaxias de la sobredensidad 2.8 y Z.Zheng 2016 en rango de redshift NB466	38
5.2. Galaxias de la sobredensidad 2.8 y Z.Zheng 2016 en rango de redshift NB470	39

Capítulo 1

Introducción

Los cúmulos son agrupaciones de galaxias unidas gravitacionalmente con concentraciones de gas caliente y materia oscura. En astronomía son laboratorios interesantes para el estudio de galaxias, ayudan a entender evolución de galaxias en función del entorno y son importantes trazadores cosmológicos que restringen los modelos del universo a gran escala. La masa máxima la cual pueden colapsarse y virializarse las agrupaciones de galaxias en alguna época del universo depende de la densidad de materia Ω_M , del espectro de potencia σ y la ecuación de estado de energía oscura. Por lo tanto tener una estadística significativa de muestras de cúmulos, cuya masa se puede medir de manera confiable, es una herramienta poderosa para restringir modelos cosmológicos. Un cúmulo de galaxias a $z=0$ puede reconocerse por la presencia de la secuencia roja, una mayor cantidad de galaxias rojas en comparación con el campo (por ejemplo Gladders et al. 2000), sin embargo hay también observaciones de estructuras densas a redshift cercano a 2 en la cual las galaxias son más masivas y más viejas que las galaxias del campo que no muestran secuencia roja (e.g., Steidel et al. 2005).

En astronomía extragaláctica se ha intentado dar una visión evolutiva a los cúmulos de galaxias, definiendo a sus antecesores como protocúmulos. Las simulaciones predicen las fases de formación y evolución de los protocúmulos según sus parámetros físicos, como la masa estelar, el color y la tasa de formación estelar (e.g., Chiang et al. 2017; Muldrew et al. 2015; Contini et al. 2016).

La identificación de sobredensidades es importante para restringir las simulaciones, obtener una teoría más precisa y comprender como los protocúmulos a altos redshift pueden convertirse en los cúmulos que conocemos hoy en día en redshift muy cercano a 0.

Debido a la complejidad de realizar observaciones profundas, existen diferentes métodos para identificar sobredensidades de galaxias a redshift $z > 2$:

i) detección por survey que cubren grandes áreas (Castellano et al. 2007; Salimbeni et al. 2009; Kang & Im 2015; Franck & McGaugh 2016) donde se buscan agrupaciones de galaxias muy cercanas en comparación con las galaxias del entorno; ii) métodos que permite de encontrar galaxias con activa formación estelar, como el del Lyman Break (e.g., Steidel et al. 1998). Por la absorción del hidrógeno neutro a longitudes de onda menores a

912 Å, las galaxias Lyman Break (LGBs) están caracterizada por una marcada diferencia en flujo en las bandas fotométrica que cubren las longitudes de onda menores y mayores a 912 Å; iii) búsqueda de sobredensidades alrededor de radiogalaxias (Pentericci et al. 2000; Venemans et al. 2007) o alrededor de galaxias submilimétricas (Miller et al. 2018); iv) detección de galaxias emisoras de línea Lyman alfa (LAEs) (Kubo et al. 2013; Zheng et al. 2016), a través de un filtro angosto.

El método de filtro angosto para detectar galaxias con emisión de Lyman alfa (LAE) es particularmente eficiente porque la línea Lyman alfa es la línea más brillante de recombinación del HI, en galaxias de formación estelar. Por naturaleza y longitud de onda, los fotones Lyman alfa son sensible al contenido de polvo y de hidrógeno neutro en el medio interestelar y circumgalactico. Por esto, el perfil de la línea lyman alfa es asimétrico y puede presentar dos picos, uno corrido hacia el azul y otro corrido hacia el rojo (por ejemplo, Verhamme et al 2008; Laursen et al. 2011). La separación y intensidad relativa de los 2 picos dependen de la densidad y cinemática del HI (Verhamme et al. 2015; Guaita et al. 2017).

Es importante entender como la forma y intensidad de la línea Lyman alfa se relaciona con la densidad del ambiente, ya que, de esta manera, podemos entender si las búsquedas de protocúmulos, basadas en los emisores de lyman alfa puede sesgar la naturaleza de las estructuras encontradas.

Para una identificación de sobredensidades en gran cantidad, el método más eficiente es el que analiza survey que cubren grandes áreas en el cielo que idealmente tengan galaxias con redshift espectroscópico, ya que el redshift fotométrico es solo es una aproximación que podría ser muy lejano al espectroscópico. Con este método se han logrado construir catálogos de sobredensidades a altos redshift de manera confiables. En este trabajo analizaremos una sobredensidad a $z = 2.8$ en el campo Chandra Deep Field South (CDFS) encontrada en Guaita et al. 2020, con el objetivo de investigar su estado de evolución. Esta sobredensidad se identificó con el método descrito por Trevese et al. (2007), Castellano et al.(2007), Salimbeni et al. (2009), Pentericci et al. (2013). Todas las galaxias usadas para identificar la sobredensidad poseen redshift fotométricos (McLure et al. 2018 y colaboración VANDELS) y un 10 % de ellas poseen redshift espectroscópicos (colaboración VANDELS y surveys de literatura en CDFS). Los redshift fotométricos se obtuvieron fiteando la fotometría multibanda de cada galaxia con modelos. Los modelos de galaxias incluyen una amplia variedad de diferentes plantillas de distribución de energía espectral, historias de formación estelar, metalicidades y prescripciones de líneas de emisión. VANDELS (a deep VIMOS survey of the CANDELS UDS and CDFS fields) es una survey espectroscópica profunda (McLure et al. 2018; Pentericci et al. 2018a; Garilli et al. 2021) de galaxias del campo donde se utilizo el instrumento VIMOS (visible Multi Object Spectrograph) del Very Large Telescope.

Algunas de las sobredensidades del catálogo de Guaita et al. 2020 ya han sido analizadas por otros trabajos de tesis. En el 2022, Natalia Valdivia estudió una sobredensidad muy particular a redshift 3.1, donde se encontró que la sobredensidad en realidad podría esta dividida en varias sobredensidades y posee una región compacta con varias galaxias LAEs. La sobredensidad a $z=2.8$ se encuentra justo en la región analizada por Zheng et al. 2016.

Adicionalmente, en este trabajo se realizarán comparaciones con otra survey, principalmente para verificar teorías evolutivas de sobredensidades. La survey que se ocupará es GOGREEN. GOGREEN (Gemini Observations of Galaxies in Rich Early ENvironments) es una survey espectroscópica de 21 cumulos de galaxias a redshift entre 1 y 1.5, donde se usó el instrumento GMOS (Gemini Multi-Object Spectrographs) del telescopio GEMINI [Balogh et al. 2020](#).

A lo largo de este trabajo, se ocuparán datos provenientes de las survey VANDELS y GOGREEN que poseen magnitudes en el sistema AB, los dos asumen la misma cosmología $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, y adoptan Chabrier (2003) funcion de masa inicial (IMF) para calcular la masa estelar y la tasa de formación estelar (SFRs). A redshift 1.034 la edad del universo era 5.611 Gyr, a redshift 1.388 la edad del universo era 4.481 Gyr, a redshift 2.8 la edad del universo era 2.276 Gyr, a redshift 3.17 la edad del universo era 1.983 Gyr.

Capítulo 2

Conjunto de datos

2.1. Datos de VANDELS

Este trabajo se enfoca principalmente en el análisis de una sobredensidad a redshift 2.8 con algunas comparaciones de una de las divisiones de la sobredensidad a 3.17 mostradas en la tesis de Natalia Valdivia (2022), la cual llamaremos sobredensidad a $z=3.1$, estas dos identificadas en (L.Guaita et al.2020), estas dos sobredensidades ocupan datos provenientes de VANDELS (McLure et al. 2018; Pentericci et al. 2018a). VANDELS es una survey espectroscópica pública de ESO dirigida a galaxias de alto redshift que apunta al campo de estudio Chandra Deep Field South (CDFS). Específicamente, VANDELS utilizará el espectrógrafo multiobjeto (VIMOS) para obtener espectros ópticos ultraprofundos y de resolución media ($0.48\ \mu\text{m}$ - $1.0\ \mu\text{m}$). Este campo tiene la cobertura HST multilongitud de onda de la survey CANDELS (Grogin et al. 2011; Koekemoer et al. 2011) en sus partes centrales, así como una gran cantidad de datos auxiliares, incluidas longitudes de onda del IR cercano y del IR lejano.

Para las regiones CANDELS, consideramos las soluciones de redshift fotométrico del equipo CANDELS (Santini et al. 2015). Para el área fuera de CANDELS, se encontraron nuevos redshift fotométricos generados por el equipo de VANDELS como se describe detalladamente en McLure et al. 2015. El redshift fotométrico se utilizó para la selección de los target espectroscópicos (galaxias pasivas, galaxias brillantes con activa formación estelar, SF- $2.4 < z < 5.5$, y galaxias de Lyman break, LBG- $3.0 < z < 5.5$ Pentericci et al. 2018a).

El ajuste final de la distribución de energía espectral (SED) se ejecutó con el código BEAGLE (Chevallard et al. 2016) y modelos de poblaciones estelares, caracterizados por un declive exponencial de historia de formación estelar, función de masa inicial de Chabrier et al (2003), la ley de atenuación del polvo de Calzetti et al. (2000) y la prescripción para la absorción del medio intergaláctico de Madau et al (1995). Los detalles se presentan en la Sección 4.4 de McLure et al. 2018. Este conjunto de parámetros nos permite recuperar la tasa de formación estelar total de la secuencia principal de galaxias y proporciona valores de masa estelar que concuerdan con los derivados por la colaboración CANDELS (Santini et al. (2015)). Dado que tenemos redshift espectroscópicos y fotometría de longitud de onda

múltiple de última generación, el error típico en los colores rest-frame está en el nivel de ± 0.2 mags y los errores de las mediciones de masa estelar suelen estar al nivel de ± 0.2 dex. Los errores típicos en la determinación de A_V y sSFR son aproximadamente ± 0.3 mags y ± 0.4 dex, respectivamente.

Para este trabajo, consideramos los redshift de VANDELS (95-100 % de probabilidad de ser correctos) y les damos prioridad sobre otras mediciones de las mismas fuentes en literatura.

Los parámetros físicos de todas las fuentes en el catálogo espectroscópicos de VANDELS se obtuvieron utilizando el ajuste de la SED con redshift fijados al valor espectroscópico (en lugar de fotométricos) y plantillas SED como se describió anteriormente.

2.1.1. Datos espectroscópicos de la literatura

Se complementó el catálogo espectroscopia de VANDELS con redshift de literatura. En el CDFS consideramos la compilación realizada por Nimish Hathi (priv. comm.), que incluye las encuestas de redshift más actualizada.

2.2. Datos de GOGREEN

The Gemini Observations of Galaxies in Rich Early ENvironments (GOGREEN) es una survey pública de cúmulos de galaxias observados por el observatorio Gemini (Balogh et al. (2021), el cual tiene 21 cúmulos de galaxias a redshift $1 < z < 1.5$, donde cada miembro de los cúmulos esta confirmado espectroscópicamente.

La preselección fotométrica para GOGREEN se obtuvo utilizando el código EAZY (Brammer, van Dokkum & Coppi 2008; versión de mayo de 2015), como descrito en van der Burg et al. (2020).

Las masas estelares y los colores a rest-frame se miden ajustando modelos de síntesis de poblaciones estelares de Bruzual & Charlot (2003) con el código FAST (Kriek et al. 2009), asumiendo una función de masa inicial de Chabriet et al (2003). Los detalles se proporcionan nuevamente en van der Burg et al. (2020). Estos modelos asumen historias simples de formación estelar parametrizado con una función exponencial decreciente. Muchos de los datos de propiedades físicas de las galaxias poseen valores discretos.

Los redshift espectroscópicos se obtuvieron aplicando el código MARZ a los espectros de GMOS (Hinton et al. 2016, Kurk et al. 2013).

2.3. Datos y observaciones de Zheng 2016

En Zheng et al. 2016, se observó el campo CDFS con tres consecutivos filtros de banda angosta (NB) con longitudes de onda centrales λ_c de 466.6, 470.3 y 476.4 nm. Las imágenes profundas de banda estrecha se obtuvieron utilizando el instrumento Mosaic II del telescopio Blanco del Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO).

Los rangos de redshift de la línea lyman alfa observada con los filtros de banda estrecha NB466, NB470 y NB475 son 2.800–2.842, 2.829–2.871 y 2.883–2.925. Encontraron un total de 257 candidatos a ser LAE (125 en NB466, 71 en NB470, y 61 en NB475).

Capítulo 3

Análisis y propiedades sobredensidad $z=2.8$

3.1. Identificación de la sobredensidad

En el catálogo de sobredensidades identificadas en [Guaita et al. 2020](#) se definieron 22 sobredensidades en un rango de redshift de $2 < z < 4$. En este trabajo solo se analizará la sobredensidad a redshift 2.8. Esta sobredensidad tiene datos provenientes tanto de la survey CANDELS ([Santini et al. 2015](#)) y de los datos de la survey espectroscópica VANDELS ([McLure et al. 2018](#); [Pentericci et al. 2018a](#)) brindando datos fotométricos y espectroscópicos, de la surveys CANDELS y VANDELS, respectivamente. Estas dos survey apuntaron el campo Chandra Deep Field South (CDFS) en la cual se encuentra nuestra sobre densidad. Se estimó la densidad usando un algoritmo de 3 dimensiones descrito detalladamente en [Trevese et al. \(2007\)](#), [Castellano et al. \(2007\)](#), [Salimbeni et al. \(2009\)](#), [Pentericci et al. \(2013\)](#). El input del algoritmo son las coordenadas y los redshift fotométricos o espectroscópicos (de VANDELS y de literatura), priorizando estos últimos si es que están disponibles, logrando así tener 3 dimensiones. Luego con estos input de todas las galaxias se crean volúmenes como celdas (mini volúmenes de un volumen general), donde pueden existir celdas sin galaxias o con muchas galaxias. Se define la “associated density” para cada celda como $\rho_N = N/V_N$, donde N son la cantidad de galaxias cercanas (vecinos cercanos), y V_N es el volumen comóvil que encierra estos vecinos cercanos. El código detecta estructuras, estudiando las densidades con una media y desviaciones estándar de 2σ , logrando definir densidades locales con cierta media y cierta desviación estándar, compuestas por una cantidad mínima de celdas y mínima cantidad de galaxias.

Las celdas no son del mismo tamaño crecen según el redshift como si fueran cáscaras, empezando en redshift $z = 2$ como $\Delta A = \Delta ra = \Delta dec = 3arcsec$ y con profundidad de redshift $\Delta z = 0.02$. Estos valores corresponden a 75 cKpc (dirección espacial) y 30 cMpc (dirección de redshift) en $z = 2$ considerando la cosmología adoptada. Fijamos la longitud máxima de la celda en las direcciones espaciales en 15 arcsec (380 cKpc en $z \sim 2$) y en $2 \times \Delta z \times (1 + z)$ en la dirección del redshift para evitar células infinitamente alargadas con

densidades locales no físicamente bajas (los detalles pueden ser encontrados en Salimbeni et al. 2009). Se definió la mínima cantidad de celdas como 10 anteriormente optimizado en Trevese et al. (2007), con cierto umbral de densidad de 6 respecto a la media y desviación estándar, y mínima cantidad de galaxias en el volumen de 5 o 10 (en $3 < z < 4$ o $2 < z < 3$, respectivamente).

Se consideraron densidades asociadas para todas las galaxias del catálogo de entrada, se centraron en las fuentes en contenedores de 0.1 corrimientos al rojo (por ejemplo, en $1.95 \leq z \leq 2.05$ o $2.05 \leq z \leq 2.15$, y así sucesivamente), y se calcularon el promedio y la desviación estándar de sus densidades asociadas (ρ_{m01} y σ_{m01} , respectivamente).

3.2. Caracterización de la sobredensidad

Para caracterizar las propiedades observacionales de nuestra sobredensidad, se determinaron un número de miembros, su distribución de redshift, sus propiedades físicas. Para calcular el volumen de la sobredensidad se puede adoptar la fórmula de una esfera con radio igual a la distancia media de miembro-a-miembro ($R_{meandist}$), $4/3 \pi R_{meandist}^3$. Por el rango de redshift de la sobredensidad, se definió un campo correspondiente, que se compone de galaxias fuera del área ocupada por la sobredensidad, con densidad dentro de $\pm 3\sigma$ alrededor de la densidad local promedio ($\langle \rho \rangle$). Para estimar el número de galaxias del campo en un volumen igual al volumen ocupado por la sobredensidad, se tienen que contar el número de galaxias de campo en un centro de volumen esférico a más de 2.5 cMpc del centro de la sobredensidad y con el mismo radio $R_{meandist}$ de la sobredensidad. Repetimos el cálculo del número de galaxias de campo en nueve volúmenes esféricos ubicados en nueve centroides diferentes y tomamos el valor de la mediana. Se estimó la masa total, M , asociada con nuestra sobredensidad identificada como la proporcional a la materia sobredensificada (Steidel et al. 1998; Cucciati et al. 2014; Lemaux et al. 2014). Aquí enumeramos algunas de las ecuaciones utilizadas para derivar M , además los detalles adicionales se pueden encontrar en los artículos citados. M se define como:

$$M = \rho_0 V (1 + \delta_m), \quad (3.1)$$

donde ρ_0 es la densidad media comóvil del Universo ($= \Omega_m \rho_{0crít} = 4.079 \times 10^{10} M_\odot \text{ cMpc}^{-3}$, dada la cosmología adoptada), δ_m es la sobredensidad de materia en la estructura, y V es el volumen ocupado por la sobredensidad en el espacio real. Para cada sobredensidad, estimamos la $n_{sobredensidad}$ como el número de miembros dividido por el volumen de sobredensidad observado y n_{campo} como el número de la media de galaxias de campo en el rango de redshift de la sobredensidad y en un volumen igual al volumen observado de la sobredensidad. Por tanto, la sobredensidad de la materia es proporcional a la sobredensidad de galaxias como:

$$(1 + b\delta_m) = C(1 + \delta_{gal}), \quad (3.2)$$

donde $\delta_{gal} = (n_{sobredensidad} - n_{campo})/n_{campo}$, C relaciona los volúmenes en espacio real (V) y observado (V_{obs}) y depende del modelo cosmológico adoptado a través de $f(z) = \Omega(z)^{4/7}$

$$C = 1 + f(z) - f(z)(1 + \delta_m)^{1/3}, \quad (3.3)$$

tal que $V = V_{obs}/C$ (donde V_{obs} está en coordenadas comoviles), y b es un factor de sesgo que va de 2 a 4 en $2 < z < 4$ (Durkalec et al. 2015). Dado el redshift de una estructura y δ_{gal} , Chiang et al. (2013) simulaciones proporcionan una predicción del tipo de cúmulo $z = 0$ a los que pueden evolucionar las sobredensidades, sin embargo algunas sobredensidades pueden no ser capaces de ensamblarse en un grupo virializado por $z = 0$. Se estudiaron el color del rest-frame U-V, la masa estelar (M_*), y la tasa específica de formación de estrellas ($sSFR = SFR_{SED}/M_*$) de los miembros de la estructura. Las magnitudes U y V del rest-frame corresponden a las magnitudes absolutas del rest-frame a 3670 Å y 5500 Å, respectivamente.

3.2.1. Masa total y volumen de la sobredensidad 2.8

Anteriormente se describieron todos los pasos para los cuales se definieron las sobredensidades, en esta sección se muestra de manera explícita el cálculo de volumen y masa para la sobredensidad 2.8. Hay diferentes formas de calcular el volumen siendo el redshift el principal problema para establecer una forma única de cálculo. EL redshift fotométrico posee una gran incertidumbre hace que tomemos volúmenes de diferente tamaño. En cálculos de sobredensidades como Chiang et al. 2017 que son simulados se tienen volúmenes ideales por lo que les dan tamaños adecuados para sus cálculo, pero al considerar galaxias observadas, nos resulta difícil tomar un volumen ideal.

Se puede definir como un volumen esférico con un $R_{meandist}$. El cálculo de $R_{meandist}$ consiste en medir cada distancia de una galaxia miembro frente a las otras galaxias miembros considerando solo Ra y Dec, repetirlo con todas las galaxias el mismo proceso, logrando una colección de distancias, para luego calcular distancia media de estas distancias, notando que algunas galaxias quedan fuera de este radio medio de la sobredensidad. El cálculo de $R_{meandist} = 2.15$ cMpc, medido desde z_{peak} encierra 26 galaxias de la sobredensidad a $z=2.8$. Por lo tanto se define entonces el volumen esférico (V_{esf}) con $R_{meandist}$. Siendo el volumen observado de la sobredensidad a $z=2.8$ calculado como $V_{esf} = 4/3 \pi R_{meandist}^3 = 41.72$ cMpc³

Recordando que $\delta_{gal} = (n_{sobredensidad} - n_{campo})/n_{campo}$, donde n_{campo} no son las galaxias totales del campo, sino que tiene un cálculo diferente. El cálculo consiste en tomar galaxias aleatorias en este caso son 9 galaxias del campo, seleccionando visualmente como representativas del campo en la observación (distribuidas en diferentes regiones de la observación), luego para cada una de las 9 galaxias definir un radio medio. Al definir un radio medio se cuentan para cada una de las 9 galaxias, todas las galaxias del campo que se encuentren

dentro de su radio medio, entonces cada una de las 9 galaxias da un número de galaxias del campo dentro de su radio medio, al ser 9 conteos diferentes, tomamos la mediana de estos valores, en nuestro cálculo la mediana es $n_{campo}=8$, con 26 galaxias dentro como $n_{sobredensidad}$, da un resultado de $\delta_{gal} = 2,25$.

Se puede formar un sistema de ecuaciones con las ecuaciones (3.2) y (3.3) con dos incógnitas, recordando que b es un factor de bias que va de 2 a 4 en redshift $2 < z < 4$ (Durkalec et al. 2015) y que $f(z)$ se define como la densidad de la materia calculada en el peak de redshift. Con este sistema de ecuaciones se pueden calcular las dos incógnitas con dos diferentes valores de bias $b_1=2$ y $b_2=4$.

Como resultado para el volúmenes observados calculados con $R_{meandist}$ $\delta_{m1}=0.79$ y $C_1=0.79$ con b_1 , $\delta_{m2}=0.46$ y $C_2=0.86$ con b_2 .

Se define el volumen real como $V=V_{obs}/C$ por lo que al tener dos valores para C se calculan dos diferentes valores para cada volumen estos volúmenes se definen como el rango que podría tener este volumen, Para el volumen esférico $V_{esf1}=52.81 \text{ cMpc}^3$ con C_1 , $V_{esf2}=48.51 \text{ cMpc}^3$ con C_2 .

Con la ecuación (3.1) se puede calcular la masa total de la sobredensidad 2.8 que estara en un rango que depende de los volúmenes anteriores, con los dos volúmenes calculados para volumen esférico obtenemos $M_{esf1} = \rho_0 V_{esf1}(1 + \delta_{m1}) = 3.85 \times 10^{12} M_{\odot}$ y $M_{esf2} = \rho_0 V_{esf2}(1 + \delta_{m2}) = 2.88 \times 10^{12} M_{\odot}$.

3.3. Características de la sobredensidad $z=2.8$

Anteriormente se describió como se identificó esta sobredensidad y como se definió la sobredensidad físicamente y se definió como se obtuvieron las propiedades físicas. Se identificaron para la sobredensidad a $z=2.8$ 45 miembros en L.Guaita et al. (2020), pero 1 miembro fue eliminado porque se obtuvo el redshift espectroscópico y tenía un redshift a 3.13. Por lo que quedo muy alejado de los redshift de los otros miembros. Por lo tanto nos quedamos con 44 miembros. De estos miembros, 8 poseen redshift espectroscópico aumentando el número original de solo 4 redshift espectroscópicos. Las galaxias del campo se definieron en un rango de Ra, Dec de la observación y redshift limitado por los redshift que poseen los miembros. El rango de Ra es de 52.95743 a 53.29618, de Dec es -27.98791 a -27.62983 como muestra la Figura (3.3), y un redshift definidos por el redshift mínimo y máximo de los miembros que es 2.769 a 2.9998 como muestra el histograma en la Figura (3.1). Un resumen de las propiedades se encuentra en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.1: Resumen de las propiedades

Sobredensidad $z=2.8$							
z_{peak} (1)	Ra(j2000) (2)	Dec(j2000) (3)	N (4)	N_{spec} (5)	N_{campo} (6)	$(U-V)_{rest}$ (7)	$10^{13}M_{\odot}$ (8)
2.8	53.2037	-27.7746	44	8	649	0.50 ± 0.26	0.2-0.3

Nota: (1) es el redshift del pico detectado por el algoritmo, (2) y (3) es la ascensión recta y declinación del pico de la sobredensidad, (4) cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad, (5) cantidad de galaxias miembros con redshift espectroscópico, (6) cantidad de galaxias en el campo en el rango de redshift de los miembros, (7) media de los colores rest-frame U - V de los miembros obtenidos de las magnitudes absolutas del rest-frame a 3700 Å y 5500 Å, salidas del ajuste SED, (8) masa estimada de la estructura con la ecuación. (3.1) y suponiendo un factor de sesgo $b = 2$ (valor izquierdo) y $b = 4$ (valor derecho).

Es importante conocer la distribución en redshift de las galaxias miembros de esta sobredensidad para conocer que tan cerca están las galaxias unas con otras en redshift. En la Figura (3.1) se puede ver que la sobredensidad posee un peak principal a $z=2.85$ donde se agrupa la mayor cantidad de galaxias, mientras hay 2 sub-peak a redshift menor en $z=2.79$ y mayor en $z=2.99$. Con una mayor cantidad de galaxias con redshift fotométrico que espectroscópico.

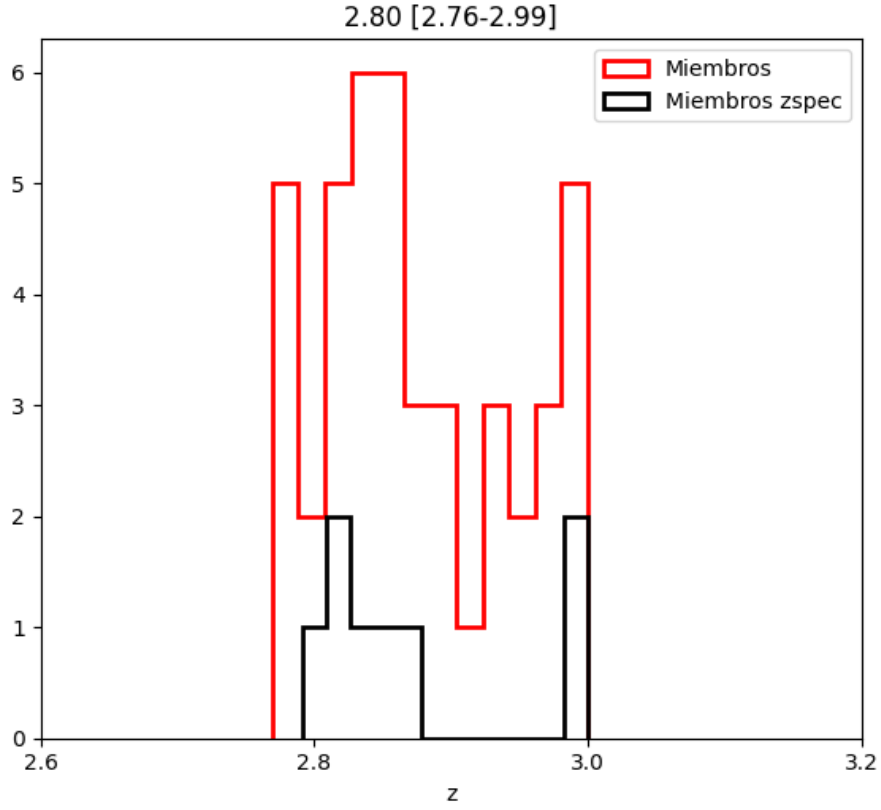


Figura 3.1: Distribución del redshift de todas las galaxias miembros en las sobredensidad. El histograma rojo son las galaxias con redshift espectroscópicos y fotométricos, mientras que el histograma negro solo las galaxias con redshift espectroscópico. El bin del histograma tiene un redshift de ~ 0.019 . El desfase de los dos histogramas es un pequeño error de la forma de graficar.

En la Figura (3.2) se puede ver la distribución de redshift de las miembros con respecto a las galaxias del campo. Las galaxias del campo son más numerosas como se puede ver en los siguientes histogramas. Claramente las galaxias del campo son muy numerosas en comparación con los miembros, siguen una distribución de forma muy escalada, con un peak cerca del peak cerca del redshift 2.79, posee varios sub-peak considerables en cantidad de galaxias, cada uno tiene alrededor de 30 galaxias más que la distribución en general.

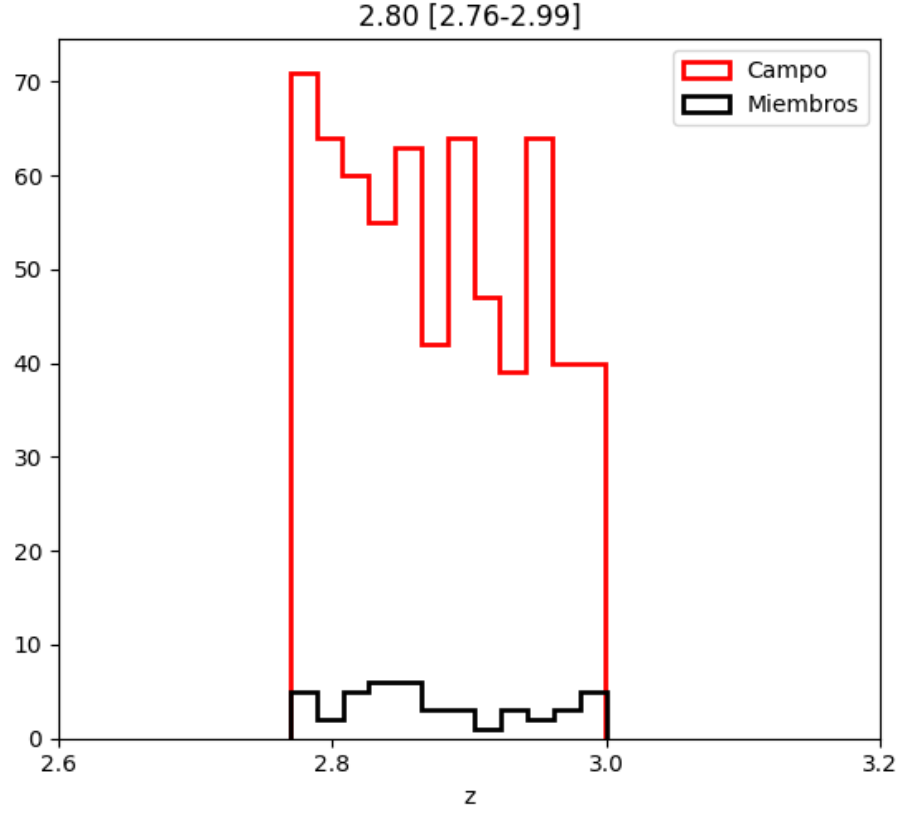


Figura 3.2: Distribución del redshift de las galaxias en las sobredensidad y las del campo. El histograma rojo son las galaxias del campo, el histograma negro solo las galaxias miembros de la sobredensidad. El bin del histograma tiene un redshift de ~ 0.019 .

Una de los aspectos importantes a analizar para conocer las propiedades de la sobredensidad es conocer como se distribuye en el área de observación en el cielo y que relación tiene con la “associated density” definida anteriormente. Esto nos muestra en que region hay la mayor densidad de galaxias como se muestra en la Figura (3.3).

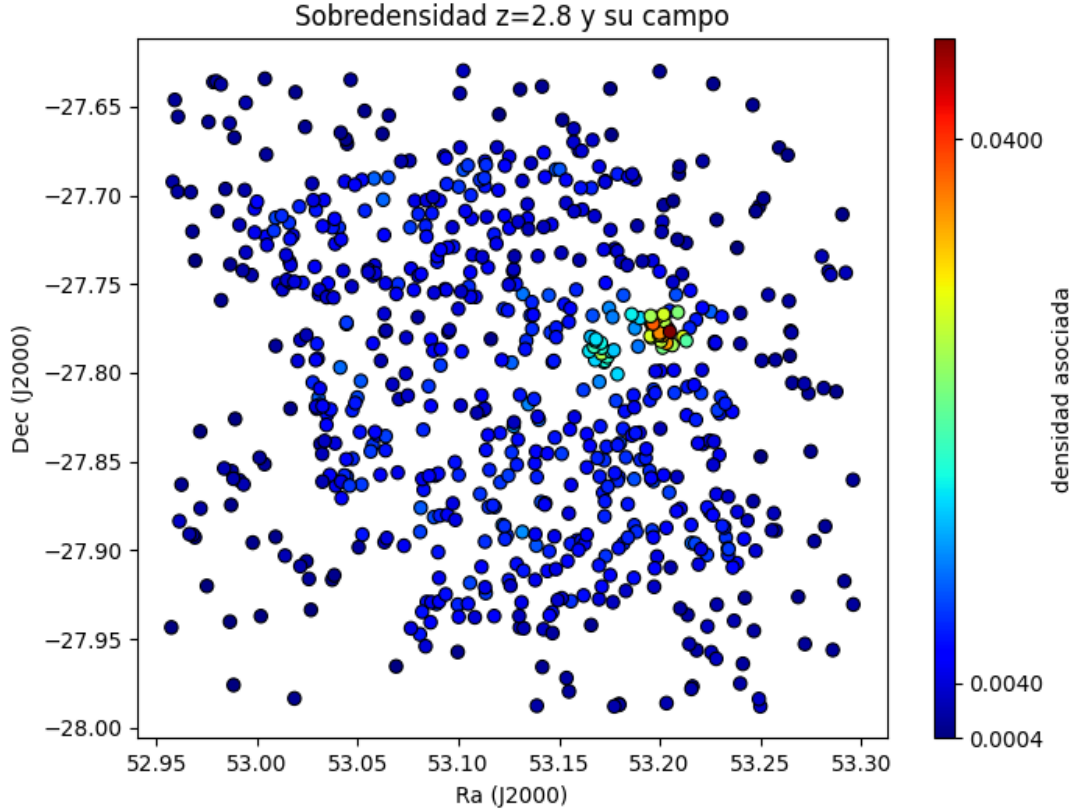


Figura 3.3: Distribución en área de observación en declinación y ascensión recta de las galaxias miembros de la sobredensidad y las galaxias del campo, la barra de color indica la densidad asociada, entre más roja, está en una región más densa y entre más azul, está en una región menos densa.

En la Figura (3.3) se puede ver el área total de la observación. Se muestran todas las galaxias observadas en el rango de redshift de la sobredensidad. La mayoría de las galaxias son del campo. En la Figura (3.3) una zona más roja cerca del centro a la derecha que es la sobredensidad a $z=2.8$, con densidad mayor. Esto significa que las galaxias están más juntas. Además se puede ver 3 categorías de densidad en la cual las regiones más lejanas son menos densas con una densidad asociada de ~ 0.0004 , y otra región con una densidad asociada un poco más grande en el campo de ~ 0.004 . En la última categoría la densidad sube bastante mostrando una notoria región con galaxias muy cercana en comparación con las del campo con una densidad asociada de 0.04.

Uno de los aspectos importantes a analizar es como se distribuye las galaxias en el área de observación con la tasa de formación estelar de la sobredensidad respecto al campo. Hay 11 galaxias del campo que no poseen datos físicos. Por lo tanto no se mostrarán en los gráficos que tengan que ver con SFR, colores, masa, edad. En figura 3.4 se puede ver

la distribución espacial de la tasa de formación estelar.

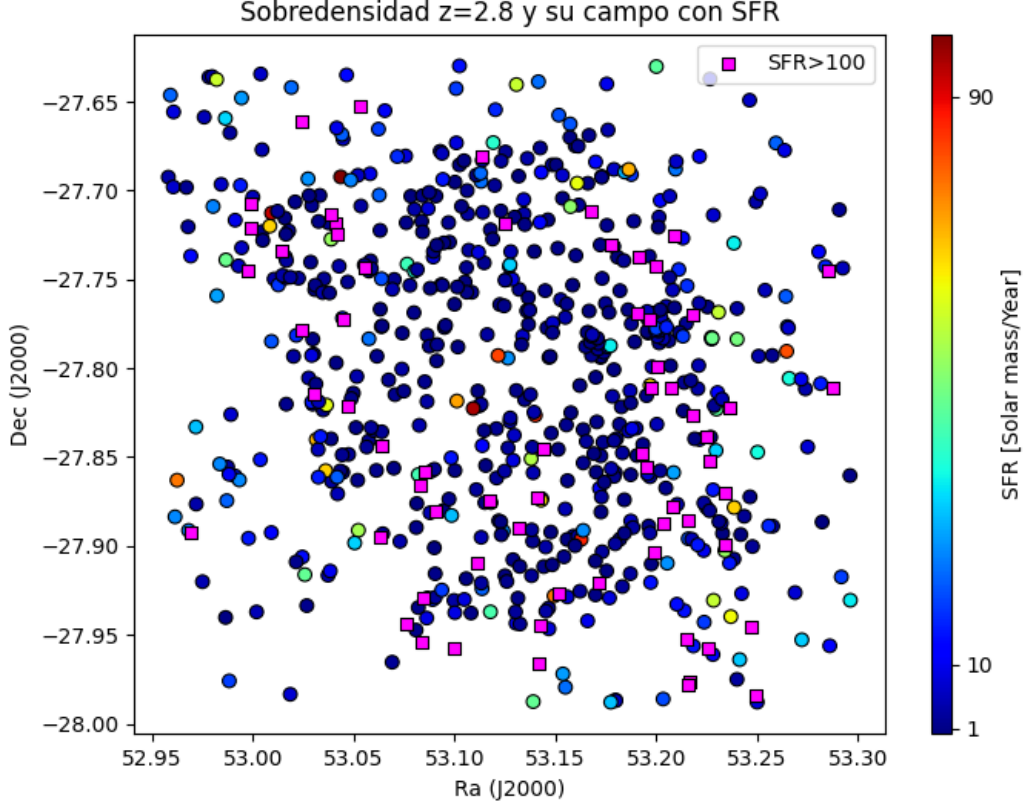


Figura 3.4: Distribución en el área de observación en declinación y ascensión recta de las galaxias miembros de la sobredensidad y las galaxias del campo, las galaxias con el símbolo de cuadrado de color magenta son galaxias $\text{SFR} > 100 [M_{\odot}/\text{Yr}]$ no están en la barra de color, ya que algunas tienen superan las 1000 $[M_{\odot}/\text{Yr}]$, la barra de color indica la tasa de formación estelar (SFR), La barra de color tiene un máximo de $\text{SFR}=100 [M_{\odot}/\text{Yr}]$, entre más roja mayor SFR y entre más azul menos SFR.

En la Figura (3.4) las galaxias que tiene color magenta tienen un $\text{SFR} > 100 [M_{\odot}/\text{Yr}]$. En la Figura (3.4) se puede ver SFR en general es bastante homogénea no hay muestras de ninguna región en particular con mayor tasa de formación estelar, las galaxias con más altas SFR se distribuyen uniformemente respecto al espacio, sin embargo al analizar las galaxias $\text{SFR} < 100 [M_{\odot}/\text{Yr}]$ se muestra que la mayoría de las galaxias con mayor SFR están en el campo, exceptuando 2 galaxias de la sobredensidad que tienen SFR mayor a 100, aunque solo tienen un SFR de 106 y 276 $[M_{\odot}/\text{Yr}]$, comparado con el campo que tiene 10 galaxias que superan las 1000 $[M_{\odot}/\text{Yr}]$. En general entre todas las galaxias con la mayor SFR, 2 miembros y 65 galaxias del campo superan las 100 $[M_{\odot}/\text{Yr}]$.

Capítulo 4

Comparaciones con otras estructuras a diferentes redshift

Una forma de verificar las posibles propiedades evolutivas de nuestras sobredensidad comparando con sobredensidades y cúmulos de otros redshift, esto dado que las propiedades cambian y se pueden sacar muchas conclusiones de estos cambios. Pueden ser muy significativos y determinar las diferentes fases evolutivas de un protocúmulo a un cúmulo.

Se realizarán comparaciones con la sobredensidad a $z=3.1$ de la división de la sobredensidad a $z=3.17$ (Guaita et al. 2020) y con 2 cúmulos de la survey GOGREEN a $z=1.034$ y a $z=1.388$ (Balogh et al. (2021)). La sobredensidad a $z=3.17$ fue analizada anteriormente en otro trabajo de tesis donde se encontró que tenía varias peak de redshift, por lo que se definió que esta sobredensidad se podía dividir en varias sobredensidades. Consideramos la estructura a $z=3.1$ que se encuentra en la misma región de una survey de LAEs (Gronwall et al. (2021)). Los cúmulos de la survey GOGREEN poseen 40 (SpARCS1051($z=1.034$)) y 11 miembros (SpARCS1034($z=1.388$)). Los datos físicos se calcularon con redshift fijo al redshift medio del cúmulo para todas las galaxias miembros porque tienen redshift muy similares. Los siguientes cuadros resumen el número de miembros de las sobredensidades y cúmulos.

Cuadro 4.1: Integrantes de la sobredensidad $z=2.8$ y el campo

Sobredensidad $z=2.8$								
z_{peak} (1)	z_{min} (2)	z_{max} (3)	N (4)	N_{zspec} (5)	N_{LAE} (6)	N_{campo} (7)	$N_{campozspec}$ (8)	$N_{campoLAE}$ (9)
2.8	2.769	2.9998	44	8	1	638	57	7

Cuadro 4.2: Integrantes de la sobredensidad $z=3.1$ y el campo

Sobredensidad $z=3.1$								
z_{peak} (1)	z_{min} (2)	z_{max} (3)	N (4)	N_{zspec} (5)	N_{LAE} (6)	N_{campo} (7)	$N_{campozspec}$ (8)	$N_{campoLAE}$ (9)
3.1	3.0031	3.2	144	25	4	357	87	8

Cuadro 4.3: Integrantes del cúmulo $z=1.034$ y el campo

SpARCS1051 $z=1.034$								
z_{mean} (1)	z_{min} (2)	z_{max} (3)	N (4)	N_{zspec} (5)	N_{LAE} (6)	N_{campo} (7)	$N_{campozspec}$ (8)	$N_{campoLAE}$ (9)
1.034	1.02413	1.0469	40	40	-	-	-	-

Cuadro 4.4: Integrantes del cúmulo $z=1.388$ y el campo

SpARCS1034 $z=1.388$								
z_{mean} (1)	z_{min} (2)	z_{max} (3)	N (4)	N_{zspec} (5)	N_{LAE} (6)	N_{campo} (7)	$N_{campozspec}$ (8)	$N_{campoLAE}$ (9)
1.388	1.38084	1.38905	11	11	-	-	-	-

Nota: Esto es para los 4 cuadros (4.1, 4.2, 4.3, 4.4). (1) Para los sobredensidades 2.8 y 3.1 es el redshift del peak de la sobredensidad hallado en L.Guatia et al. (2020) en cuanto a los cúmulos de GOGREEN es la media del redshift de los miembros de cada cúmulo. (2) redshift mínimo de los miembros y el campo. (3) redshift máximo de los miembros y el campo. (4) Cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad o de los cúmulos. (5) Cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad o cúmulos con redshift espectroscópico. (6) Cantidad de galaxias emisoras de línea lyman alfa en los miembros de la sobredensidad o cúmulo. (7) Cantidad de galaxias del campo. (8) Cantidad de galaxias del campo con redshift espectroscopico. (9) Cantidad de galaxias del campo emisoras de línea lyman alfa.

4.1. Comparación de colores U-V vs V-J

Uno de los parámetros interesantes a analizar es el color de cada galaxia esto pueden darnos información de la tasa de formación estelar de cada galaxia como se muestra en William et al. (2009) que es posible definir cuando una galaxia es pasiva, es decir de muy poca formación estelar según el color. Este indicador de formación estelar está relacionado con el gráfico U-V vs V-J, esto depende de cada filtro ocupado. En general hay diferentes definiciones de cuales serían los límites para encontrar galaxias en formación según el redshift y los filtros. Se ha estudiado esto en profundidad en Carnall et al. (2019) donde se ha determinado que la variación de los límites de los indicadores no cambian mucho a diferentes redshift. En William et al. (2009) se define 3 límites diferentes para encontrar

galaxias pasivas dependiendo del redshift. Un límite para galaxias a redshift $0 < z < 0.5$, otro para galaxias a redshift $0.5 < z < 1.0$ y otro para galaxias de redshift $1.0 < z < 2.0$. En [Carnall et al. \(2019\)](#) como ya se había dicho anteriormente se demostró que estos límites no varían demasiado en cada redshift, incluso se puede ocupar para galaxias a $z > 2.0$, los mismos límites que para redshift entre $0 < z < 0.5$, por lo en el caso de las dos sobredensidad comparadas del catálogo de L.Guaita et al. (2020) se ocuparán límites diferentes de los cúmulos de GOGREEN.

Para galaxias en $1.0 < z < 2.0$ adoptada por [Williams et al. \(2013\)](#):

$$(U - V) > 0.88 \times (V - J) + 0.59, \quad (4.1)$$

$$(U - V) > 1.3, \quad (4.2)$$

$$(V - J) < 1.5, \quad (4.3)$$

Para galaxias en $z > 2.0$ adoptada por [Carnall et al. \(2019\)](#):

$$(U - V) > 0.88 \times (V - J) + 0.69, \quad (4.4)$$

$$(V - J) < 1.6, \quad (4.5)$$

Además como el color es un indicador de formación estelar en la galaxia, implica que podría darnos información en comparación con el campo, nos puede mostrar si la sobredensidad está evolucionando más rapido que el campo.

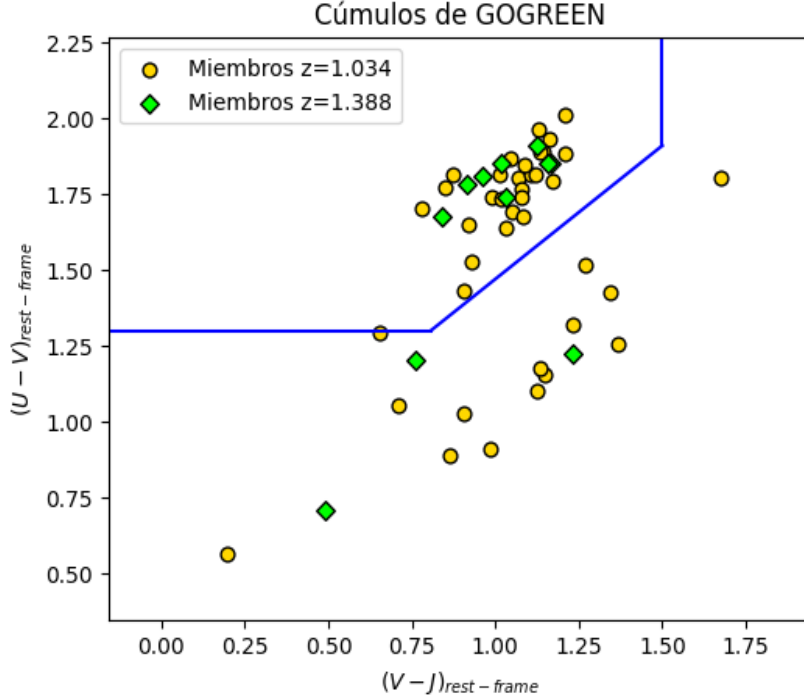


Figura 4.1: Gráfico $(U - V)_{rest-frame}$ vs $(V - J)_{rest-frame}$ de las galaxias de los cúmulos SpARCS1051 y SpARCS1034 de GOGREEN. Las líneas azules son las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3.

En la Figura (4.1) se muestran los cúmulos de GOGREEN, esta survey no entrega información sobre los errores, las líneas azules son las ecuaciones (4.1), (4.2), (4.3). Las cuales están definidas para galaxias de redshift $1.0 < z < 2.0$, tienen colores consistentes con los de las galaxias pasivas. Todas las galaxias encerradas en las líneas azules en la parte superior izquierda son que tienen colores de galaxias pasivas. Es importante notar que muchas galaxias a este redshift son pasivas, por lo cual tienen una tasa de formación estelar muy baja. El cúmulo $z=1.034$ posee 40 galaxias miembros de las cuales 26 muestran ser pasivas mientras que el cúmulo $z=1.388$ posee 11 galaxias miembros de las cuales 8 también muestran ser pasivas. Para este redshift se espera que los miembros de los cúmulos tengan muchas galaxias pasivas y tienen gran cantidad de galaxias con baja tasa de formación estelar.

En cuanto a las galaxias de las sobredensidad a altos redshift se presentan en un gráfico diferente y muestran una situación muy diferente.

En la Figura (4.2) se muestra las sobredensidad a redshift $z=2.8$ y a $z=3.1$ en él se ven las líneas verdes son las ecuaciones (4.4) y (4.5) que muestran los límites de galaxias con colores consistentes con galaxias pasivas a $z > 2.8$, en la parte superior izquierda se muestran encerradas las posibles galaxias pasivas. En este caso para estas galaxias a redshift alto se muestra muy diferente al gráfico anterior, ya que solo hay una galaxia pasiva y esta

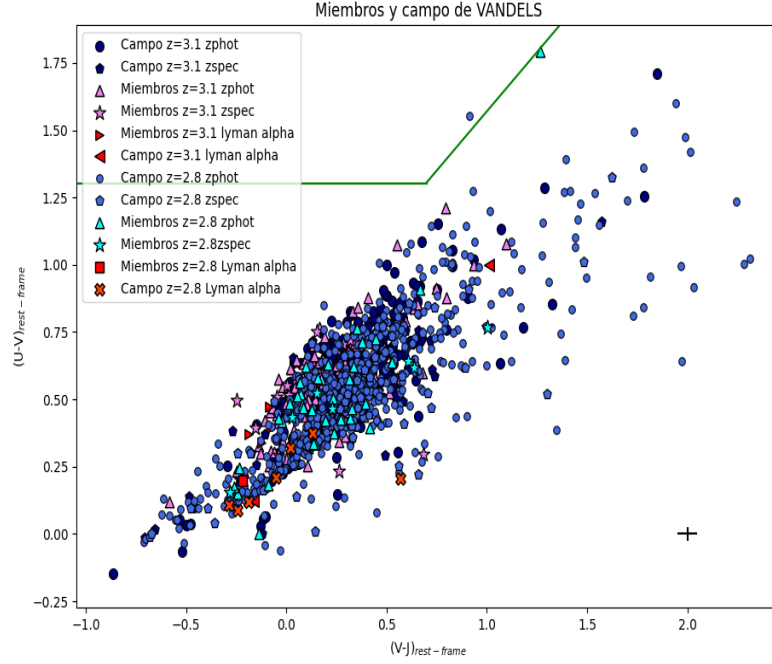


Figura 4.2: Gráfico $(U-V)_{rest-frame}$ vs $(V-J)_{rest-frame}$ de las galaxias de las sobredensidades a redshift $z=2.8$ y $z=3.17$. Las líneas verdes son las ecuaciones 4.4, 4.5.

muy cerca del límite. Esto indica que la mayoría de las galaxias están con alta formación estelar. En este último gráfico también están marcadas las galaxias emisoras de lyman alfa, las cuales son las más alejadas las líneas verdes por lo que tienden a ser galaxias más azules y con activa formación estelar.

Para mostrar de mejor manera lo que estamos diciendo es mejor mostrar las medias de los colores de forma gráfica separando las medias de los colores de los miembros y las del campo para ver claramente la diferencia.

En la última Figura (4.3) se muestra medias de los colores $(U-V)_{rest-frame}$ y $(V-J)_{rest-frame}$. Los símbolos verdes son $(U-V)_{rest-frame}$ y $(V-J)_{rest-frame}$ la media de todas las galaxias de cada cúmulo. Sus medias muestran que en general los cúmulos tiene a ser pasivos (poca formación estelar), ya que se encuentran encerradas en la zona superior izquierda con líneas azules que delimitan los límites para redshift $1.0 < z < 2.0$ para galaxias pasivas según Balogh et al. (2021). Esto además contrasta con el análisis de las medias de las sobredensidades a alto redshift que muestran ser más azules que los cúmulos a $z < 2$, las cuales se encuentran fuera y muy alejadas de las líneas, demostrando que poseen una activa formación estelar. La diferencia es considerable por lo que las teorías de evolución donde indican que los protocúmulos pasan por unos periodos de alta formación estelar hasta llegar a una decadencia en formación estelar podría ser correcta a redshift $z < 1.5$. Las sobredensidades a redshift 2.8 y 3.1 muestran que poseen alta formación estelar con colores

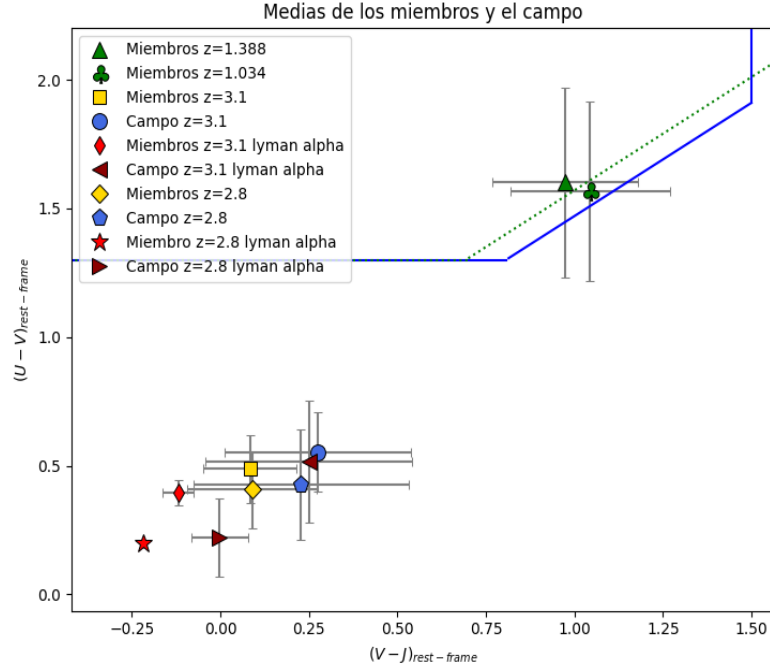


Figura 4.3: Gráfico $(U-V)_{rest-frame}$ vs $(V-J)_{rest-frame}$ de las medias de las galaxias de los sobredensidades y de los cúmulos, con el campo por separado. Las líneas azules son las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3. La línea verde punteada es la de las ecuaciones 4.4 y 4.5. El triángulo verde es la media de todas las galaxias miembros de SpARCS1034. El trebol verde es la media de todas las galaxias miembros de SpARCS1051. El cuadrado dorado es la media de todas las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=3.1$. El rombo dorado es la media de todas las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$. El círculo azul es la media de todas las galaxias del campo de la sobredensidad 3.1. El pentágono azul es la media de todas las galaxias del campo de la sobredensidad 2.8. El triángulo hacia la izquierda rojo oscuro es la media de todas las galaxias lyman alfa del campo de la sobredensidad a $z=3.1$. El triángulo hacia la derecha rojo oscuro es la media de todas las galaxias lyman alfa del campo de la sobredensidad a $z=2.8$. El diamante rojo es la media de todas las galaxias con emisión lyman alfa miembros de la sobredensidad $z=3.1$. La estrella roja es la media de todas las galaxias con emisión lyman alfa de la sobredensidad 2.8. Los errores son las desviaciones estándar de todas las galaxias con excepción de los miembros con emisión lyman alfa de la sobredensidad 2.8 que tiene solo un miembro.

más azules en $(U-V)_{rest-frame}$ y $(V-J)_{rest-frame}$, destacando notoriamente las galaxias con emisión lyman alfa que son más azules mostrando una formación estelar mayor que los miembros sin emisión lyman alfa y las galaxias del campo.

4.2. Comparación de sSFR vs Masa

El análisis de sSFR es interesante, ya que nos da información más representativa de la formación estelar que esta presentando cada galaxia en relación a su masa, recordando que $sSFR = SFR/M^*$ donde M^* es la masa estelar de la galaxia. Un sSFR alto podría estar mostrando que esa galaxia en particular tiene una formación estelar mayor a la normal por algún efecto adicional. Es importante analizar la sobredensidad a $z=2.8$ como se muestra en la Figura (4.4):

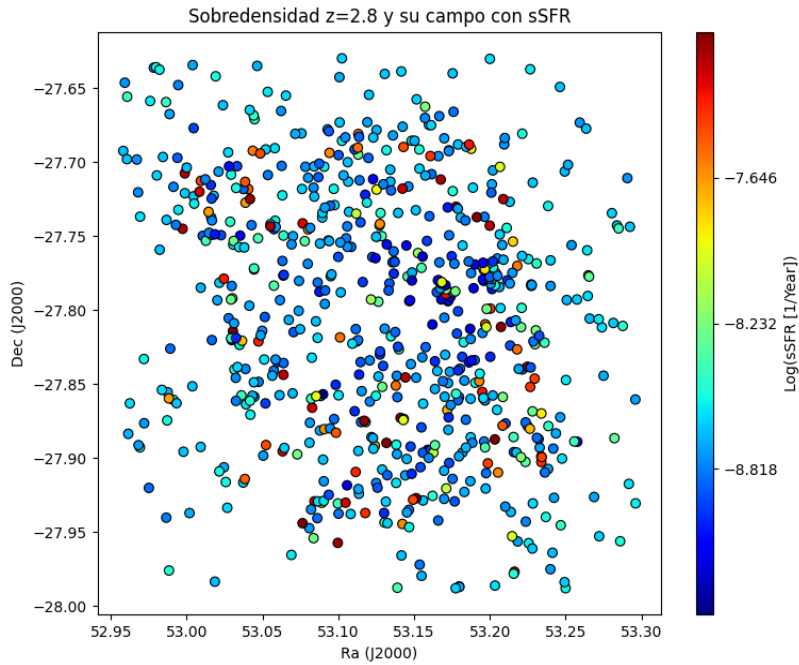


Figura 4.4: Gráfico de la distribución espacial de todas las galaxias de la sobredensidad 2.8 y sus sSFR en logaritmos respectiva. La barra de color corresponde a $\log(sSFR)$ entre más roja mayor $\log(sSFR)$, entre más azul menos $\log(sSFR)$.

La Figura (4.4) muestra que la mayoría de las galaxias tienen una sSFR similar, mientras que las galaxias que poseen valores extremos de sSFR están distribuidas aleatoriamente sin distinguir ninguna región en particular con mayor o menor sSFR. Esto dado que la mayoría de las galaxias siguen la relación de la masa y tasa de formación a menos que exista algo en particular que los haga tener una mayor SFR en relación a su masa. La distribución en el área de observación con sSFR es bastante homogénea por lo que necesita un estudio por separado para notar diferencias más significativas, aun así el gráfico nos permite ver que no existe ninguna región clara con más sSFR que otra.

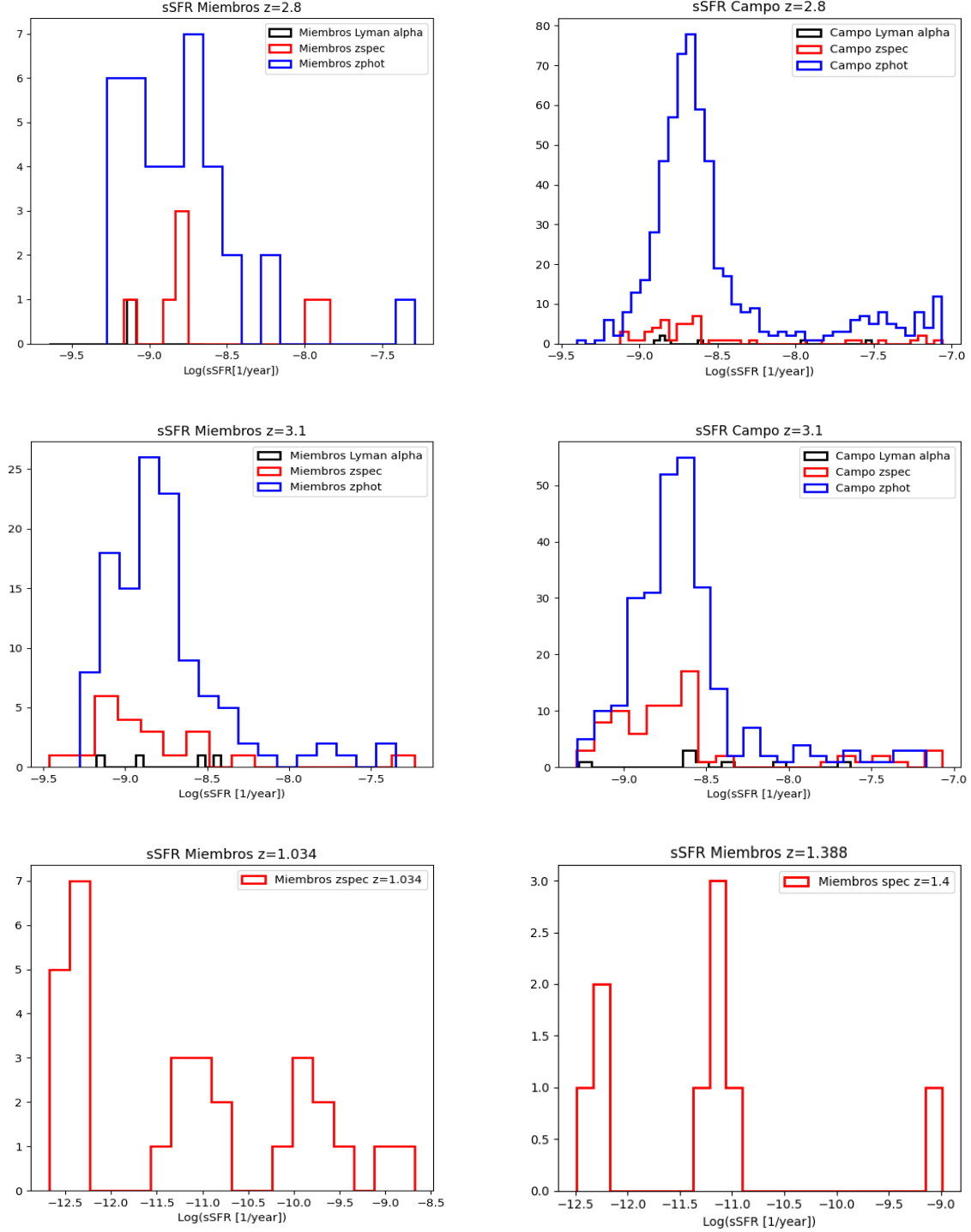


Figura 4.5: Histogramas de sSFR de las sobredensidades, su campo asociado y los cúmulos divididos en galaxias con emisión lyman alfa, redshift espectroscópico y fotométrico.

En la Figura (4.5) y las gráficas posteriores en este trabajo con sSFR que se muestran los cúmulos de GOGREEN, no se consideran las galaxias con $\log(\text{sSFR} [1/\text{year}])$ inferior a -13 por ser demasiado bajas. Por esto solo se consideran 30 de los 40 miembros del cúmulo SpARCS1051 y 9 de los 11 miembros del cúmulo SpARCS1034.

En la Figura (4.5) se ven histogramas de las sobredensidades, cúmulos y campos. En el histograma superior izquierda se ve el $\log(\text{sSFR})$ de los miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ se ve un gran predominio de $\log(\text{sSFR})$ en cantidad de galaxias entre $\sim -8.5 > \log(\text{sSFR})[1/\text{year}] > -9.3$ que se ve en las galaxias fotométricas, pero también en las galaxias espectroscópicas se ve un pequeño peak, además se ve un doble peak, el predominante a $\log(\text{sSFR}) \sim -8.7$ y el segundo a $\log(\text{sSFR}) \sim -9.3$. El histograma superior derecho muestra el $\log(\text{sSFR})$ del campo asociado a la sobredensidad a $z=2.8$ muestra un gran peak de sSFR en $\log(\text{sSFR}) \approx -8.7$, además un pequeño peak en $\log(\text{sSFR}) \approx -7.1$. El histograma de la mitad izquierdo muestra los miembros de la sobredensidad a $z=3.1$ que posee un peak ancho en $\log(\text{sSFR}) \approx -8.7$ y un segundo peak más pequeño a $\log(\text{sSFR}) \sim -9.2$. El histograma de la mitad derecha muestra las galaxias del campo de la sobredensidad $z=3.1$, en él se ve un peak a un $\log(\text{sSFR}) \approx -8.7$. En el histograma inferior izquierdo se ve los miembros del cúmulo $z=1.034$ se nota un peak en $\log(\text{sSFR})$ muy bajo cercano a -12.4. El histograma inferior derecha se ven los miembros del cúmulo $z=1.388$ que muestra un peak a $\log(\text{sSFR})$ cercano -11.2, pero solo con 3 galaxias.

En general en los histogramas mostrados se puede notar que las dos sobredensidades en $z \sim 3$ tienen un peak claro tanto en sus miembros como en el campo en $\log(\text{sSFR}) \approx -8.7$ que se repite en los 4 histogramas, esto podría ser una característica de las sobredensidades y en el campo con activa formación estelar a estos redshift. Otro detalle a notar es que en el campo de las dos sobredensidades a $z \sim 3$ logra tener galaxias con más $\log(\text{sSFR})$ cercano a $\log(\text{sSFR}) \sim -7.0$ comparado con los miembros, esto se repite en las dos campos incluso con un pequeño peak en el campo asociado a la sobredensidad a $z=2.8$ en $\log(\text{sSFR}) \sim -7.1$. Para los cúmulos de GOGREEN pueden tener un bajo $\log(\text{sSFR})$ debido a que las galaxias de estos cúmulos ya estén más envejecidas y están bajando su formación estelar.

La medida de sSFR puede indicar si las galaxias son jóvenes o viejas, aunque esta relación es un poco ambigua porque la galaxia puede haber acumulado masa y esto haría que la sSFR fuera baja, esto no necesariamente indica que las galaxias son viejas. La Figura (4.6) podría dar información sobre ello, por lo que es importante analizar el gráfico de sSFR vs masa de la sobredensidad a $z=2.8$.

En la Figura (4.6) muestra que en general tanto los miembros como el campo de la sobredensidad 2.8 tienen similares $\log(\text{sSFR})$ mostrando una gran franja que contiene la mayoría de las galaxias, esta podría inclinación muy horizontal que podría ser característica de esta sobredensidad a $z=2.8$ y su campo asociado. Algunas de las galaxias del campo son las que poseen más altos $\log(\text{sSFR})$ distanciándose mucho de la mayoría de las galaxias. En cuanto a la masa tienen una distribución bastante similar entre galaxias miembros y del campo. Se ve que existe una gran rango de masas de la sobredensidad $z=2.8$ desde $\log(\text{Masa})$ cercano a 8 hasta cercano a 11.5. Que la mayoría de las galaxias tengan una

$\log(\text{sSFR})$ similar podría informar que están evolucionando juntas, siguiendo una $\log(\text{sSFR})$ en común como muestran los histogramas de la Figura (4.5) en que las galaxias se encuentra un peak de galaxias con la misma $\log(\text{sSFR})$. En general los miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ no se alejan tanto de la mayoría de las

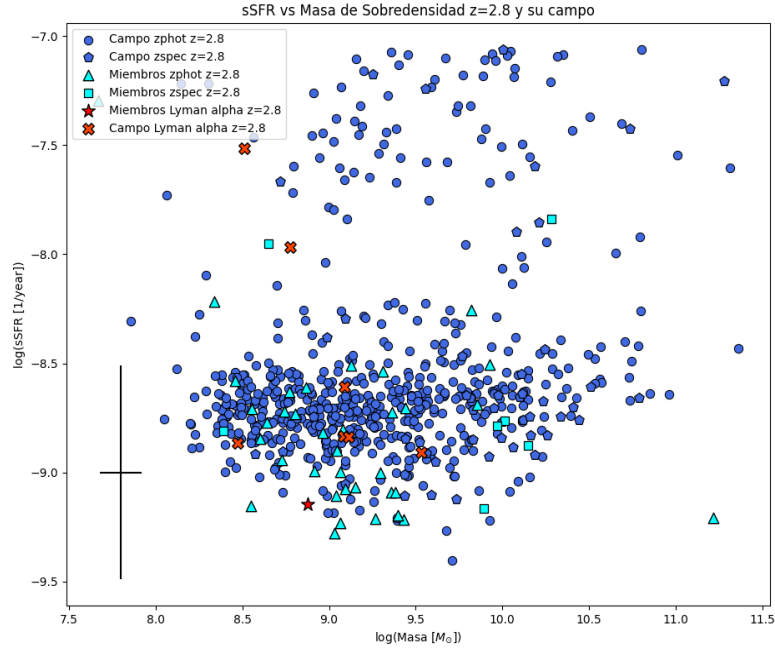


Figura 4.6: Distribución de las galaxias en $\log(\text{sSFR} [1/\text{year}])$ vs $\log(\text{Masa} [M_{\odot}])$. Los círculos azules son las galaxias del campo con redshift fotométrico. Los pentágonos azules son las galaxias del campo con redshift espectroscópico. Los triángulos color celeste son los miembros con redshift fotométrico. Los cuadrados color celeste son los miembros con redshift espectroscópico. La estrella roja es la galaxia miembro con emisión lyman alfa. La cruz roja son las galaxias del campo con emisión lyman alfa. El error es el error medio de todas las galaxias.

galaxias del campo asociado en cuanto a $\log(\text{sSFR})$. Las galaxias que se encuentran en el segundo peak de los miembros de las sobredensidades a $z=2.8$ y $z=3.1$ podrían ir a otro ritmo de formación estelar.

Es interesante realizar una comparación en el gráfico de $\log(\text{sSFR})$ vs $\log(\text{Masa})$ con sobredensidades y cúmulos a diferentes redshift, esto podría darnos mejores características de nuestra sobredensidad $z=2.8$ y interpretar mejor que diferencias tienen las galaxias más viejas.

En la Figura (4.7) se muestran solo las galaxias miembros de las sobredensidades a $z=2.8$, $z=3.1$ y los cúmulos de GOGREEN a $z=1.034$, $z=1.388$ en ella se puede ver que los cúmulos de GOGREEN están muy alejados de las galaxias de las sobredensidades,

las sobredensidades poseen datos muy similares entre sí como se puede ver en los símbolos violetas y celestes, la distribución de las sobredensidades a $z=3.1$ y $z=2.8$ es muy parecida podría ser una características esperable a sobredensidades con activa formación estelar a $z \sim 3$, lo que se puede ver es que la mayoría de las galaxias de estas sobredensidades están concentradas a un $\log(\text{sSFR})$ cercano a -9 , lo que evidencia de que a pesar de ser sobredensidades diferentes estan evolucionando a un

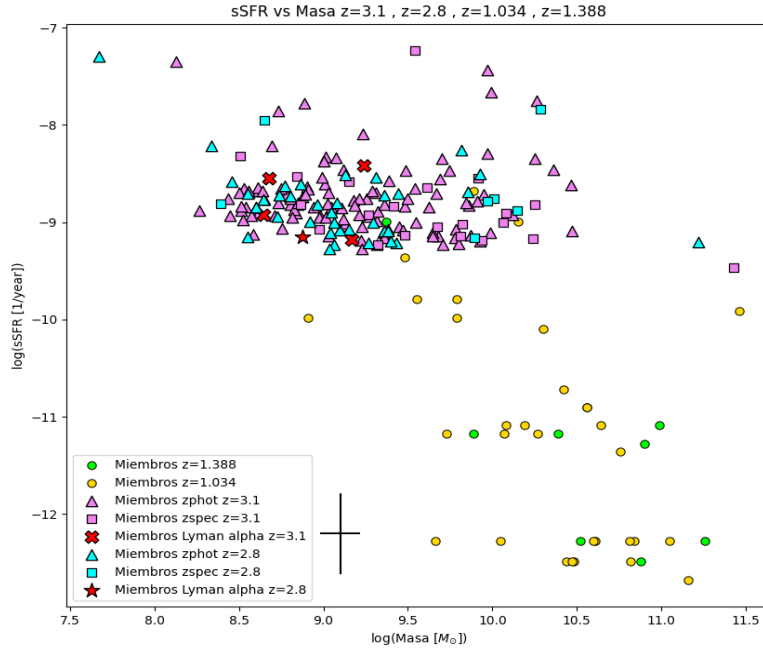


Figura 4.7: Distribución de las galaxias en $\log(\text{sSFR})$ vs $\log(\text{Masa})$ de las sobredensidades a $z=3.1$, $z=2.8$ y de los cúmulos a $z=1.034$, $z=1.388$. Los círculos verdes son las galaxias miembros del cúmulo a $z=1.388$. Los círculos amarillos son las galaxias miembros del cúmulo a $z=1.034$. Los triángulos de color violeta son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=3.1$ con redshift fotométrico. Los cuadrados de color violeta son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=3.1$ con redshift espectroscópico. Las cruces rojas son las galaxias miembros de la sobredensidad $z=3.1$ con emisión lyman alfa. Los triángulos celeste son las galaxias miembros de la sobredensidad $z=2.8$ con redshift fotométrico. Los cuadrados celestes son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Las estrellas rojas son las galaxias miembros de la sobredensidad $z=2.8$ con emisión lyman alfa. Los errores son los errores medios solo para los miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ y $z=3.1$, los miembros de los cúmulos de GOGREEN no poseen errores disponibles.

ritmo en conjunto muy similar.

Otra característica notoria entre las dos sobredensidades es que las galaxias con emisión lyman alfa están en la zona izquierda es decir entre las galaxias miembros de las

sobredensidades son de las galaxias que poseen menos $\log(\text{Masa})$ que la mayoría de las galaxias.

En la Figura (4.7) los miembros de los cúmulos de GOGREEN se muestran con los círculos verdes y amarillos se muestran muy alejadas de las sobredensidades, estos poseen una clara diferencia de $\log(\text{sSFR})$ llegando a valores similares a $\log(\text{sSFR}) \sim -12$, mostrando que los cúmulos poseen muy baja tasa de formación estelar a $z=1.034$ y a $z=1.388$ comparada con la sobredensidades a $z=3.1$ y $z=2.8$. Esto es un indicador de los cúmulos de GOGREEN poseen galaxias mucho más viejas que las galaxias de la sobredensidades. En la Figura (4.7) se muestra que las galaxias de los cúmulos poseen $\log(\text{Masa})$ mayores que los de la sobredensidades.

Estas diferencias son importantes para mostrar que las sobredensidades a redshift $z=3.1$ y $z=2.8$ podrían transformarse en cúmulos en redshift ~ 1 con resultados similares a los cúmulos de GOGREEN.

4.3. Comparación de Age/Tau vs sSFR

Entre los parámetros físicos proporcionados por VANDELS tenemos el tiempo escala (τ), este valor es el tiempo que dura el episodio de formación estelar de la galaxia, este episodio puede no haber terminado para galaxias a altos redshift por lo que se espera una gran diferencia entre galaxias a diferentes redshift. Además tenemos la edad de las galaxias desde que se formó hasta el redshift observado, este tiempo se denota con t .

En la Figura (4.8) se muestra el $\log(\text{Age}/\tau)$ vs $\log(\text{sSFR})$ para las galaxias de a sobre-densidad a $z=2.8$ y su campo asociado:

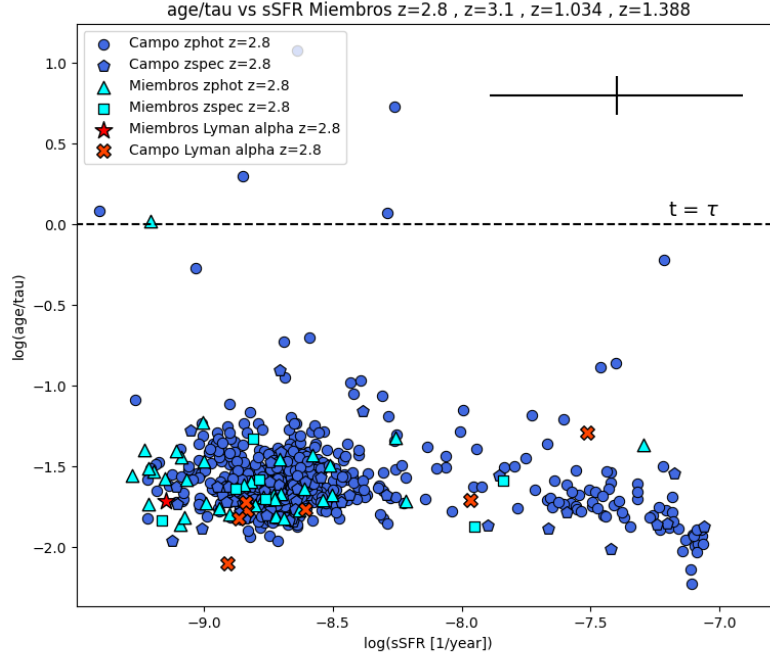


Figura 4.8: Distribución de las galaxias en $\log(\text{Age}/\text{Tau})$ vs $\log(\text{sSFR} [1/\text{Year}])$. Círculos azules son las galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift fotométrico. Pentágonos azules son las galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Los triángulos celestes son galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift fotométrico. Los cuadrados celestes son miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Las estrellas rojas son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa. Las cruces rojas son galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa. El error es el error medio de todas las galaxias. La línea punteada muestra el momento que la edad es igual al tiempo que dura el episodio de formación estelar.

En la Figura (4.8) se muestran las galaxias miembros de la sobredensidad $z=2.8$ y su campo asociado. La línea negra muestra cuando $\log(\text{Age}/\text{Tau})=0$ es decir $t=\tau$. Se puede ver que la mayoría de las galaxias tienen valores $\log(\text{Age}/\text{Tau}) < 0$ lo que significa que el valor τ es mayor para la mayoría de las galaxias que t . Por lo tanto las galaxias aún no terminan el episodio de formación estelar y en general poseen un $\log(\text{Age}/\text{Tau}) \sim -1.5$ cerca de 70 millones de años de terminar para terminar el episodio de formación estelar. Algunas pocas galaxias ya terminaron el episodio de formación estelar (5 galaxias del campo), además 1 galaxia miembro de la sobredensidad a $z=2.8$ está justo terminando el episodio. A pesar de tener una $\log(\text{Age}/\text{Tau})$ bastante similar entre las galaxias miembros y el campo, poseen una gran dispersión de $\log(\text{sSFR})$, siendo las galaxias miembros las que poseen más bajo $\log(\text{sSFR})$ junto a las galaxias con emisión Lyman alfa, mientras que las galaxias de campo tienen mayor variedad, con dos picos muy notorios vistos anteriormente en los histogramas de la Figura (4.5).

La Figura (4.9) muestra una comparación de los miembros de las sobredensidades a $z=2.8$, $z=3.1$ y los miembros de los cúmulos de GOGREEN a $z=1.034$, $z=1.388$. Los miembros de las dos sobredensidades se encuentran muy juntos en la Figura(4.9) debido a que tienen características muy similares. Las dos sobredensidades tienen valores cercanos a $\log(\text{Age}/\text{Tau}) \sim -1.5$, por lo que tienen tiempos similares para terminar el episodio de formación estelar a pesar de ello algunas galaxias miembros de la sobredensidad a $z=3.1$ ya se están aproximando a la finalización del episodio y incluso 5 galaxias de esta misma sobredensidad ya terminaron el episodio comparándose con los cúmulos a $z \sim 1.2$, es interesante notar que la sobredensidad a $z=3.1$ posee más galaxias aproximándose a su término de su episodio en comparación que la sobredensidad a $z=2.8$ recalando la importancia, ya que esta a un redshift mayor. La sobredensidad a $z=2.8$ se encuentra más junta que la sobredensidad $z=3.1$, pero aun así posee una galaxia muy particular que también estaba en la Figura (4.8) que está muy cerca de la línea punteada horizontal, terminado el episodio de formación estelar. Con respecto a $\log(\text{sSFR})$ las sobredensidades son muy similares como se había visto anteriormente con un valor muy cercano a $\log(\text{sSFR}) \sim -9$. Los cúmulos de GOGREEN poseen datos discretos para el cálculo de sus parámetros por lo que se encuentran en lugares apartados uno de otro, algunas galaxias tienen datos iguales por lo que se encuentran unas galaxias encima de otras en el gráfico, es por ello que se ve que algunas galaxias miembros del cúmulo a $z=1.388$ (cuadrado verde) tiene encima una galaxia del cúmulo a $z=1.034$ (círculos amarillos), incluso algunas galaxias no se ven porque están encima de otras, pero son la misma cantidad de galaxias de la Figura (4.7). Las galaxias de los cúmulos muestran diferencias considerables con las galaxias de las sobredensidades mostrando que en el gráfico se van desplazando hacia la región superior izquierda a menor redshift. Las galaxias de los cúmulos ya terminaron el episodio de formación estelar siendo su edad superior al tiempo escala también poseen baja formación estelar con respecto a su masa en comparación con las sobredensidades. Unos casos particulares son algunas galaxias de los cúmulos tienen $\log(\text{sSFR})$ similares a las galaxias a $z \sim 3$ producto de que tienen baja masa, además unas galaxias del cúmulo a $z=1.034$ está terminando el episodio de formación estelar. Un caso relevante en el gráfico es una galaxia con emisión Lyman alfa

miembro de la sobredensidad a $z=3.1$ a pesar de que ya terminó el episodio de formación estelar tiene una alta formación estelar con respecto a su masa como muestra un $\log(\text{sSFR}) \sim -8.2$.

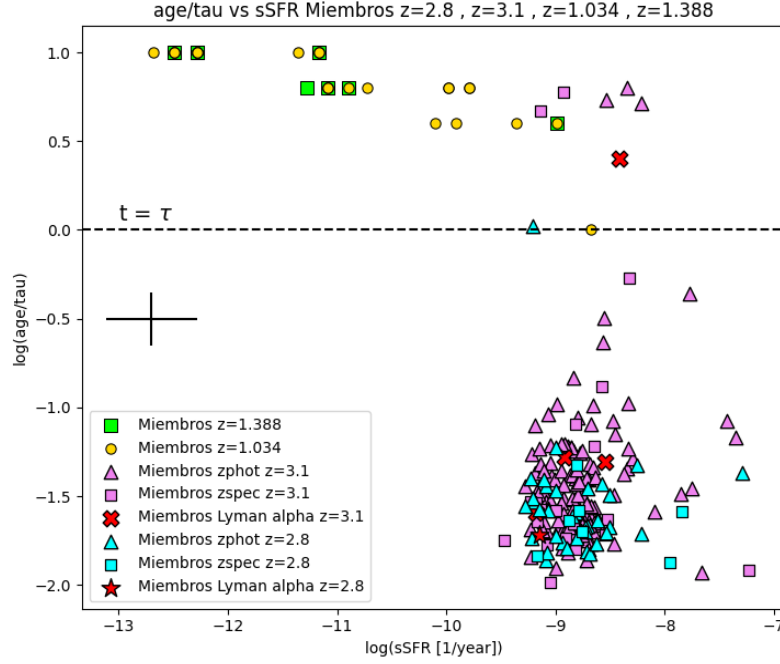


Figura 4.9: Distribución de las galaxias en $\log(\text{Age}/\text{Tau})$ vs $\log(\text{sSFR} [1/\text{Year}])$ de las sobredensidades y cúmulos). Los cuadros verdes son las galaxias miembros del cúmulo SpARCS1034 a $z=1.388$. Los círculos amarillos son las galaxias miembros del cúmulo SpARCS1051 a $z=1.034$. Los triángulos violetas son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=3.1$ con redshift fotométrico. Los cuadrados violetas son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=3.1$ con redshift espectroscópico. Las cruces rojas son las galaxias miembros de la sobredensidad $z=3.1$ con emisión lyman alfa. Los triángulos celestes son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift fotométrico. Los cuadrados celestes son los miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Las estrellas rojas son los miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa. La línea punteada negra muestra cuando $t=\tau$, es decir $\log(\text{Age}/\text{Tau})=0$. El error es el error promedio de todas las galaxias de las sobredensidades a $z=2.8$ y $z=3.1$. Las galaxias de GOGREEN no presentan errores. Algunas galaxias se encuentran encima de otras en la survey de GOGREEN debido a la utilización de valores discretos.

4.4. Comparación de densidad superficial de tasa de formación estelar vs masa estelar

Una parámetro importante es la densidad superficial de tasa de formación estelar que puede indicarnos la relación que existe entre la tasa de formación estelar en comparación con la superficie de la galaxia. La densidad superficial de tasa de formación estelar se calcula como $\Sigma_{SFR} = SFR / AREA$ donde el AREA es física (no proyectada) para cada galaxia, calculada como $AREA = 2 \times \pi \times R_{eff}^2$ donde el radio efectivo es la mitad del semi eje mayor $R_{eff} = a \times 1/2$ llamado la mitad del radio luminoso de la galaxia. Obtener el radio efectivo para calcular la superficie de las galaxias es difícil se requiere una dedicación especial por lo que los datos sobre el radio efectivo de las galaxias es escaso por lo que este dato es proporcionado por el catálogo (Van der Wel et al. 2012) en el cual se estimaron la mitad del radio luminoso (Half Light Radius o HLR) en zona más central del campo ECDFS de CANDELS. Algunas galaxias del catálogo (Van der Wel et al. 2012) coinciden con las galaxias de la sobredensidad y su campo asociado, por lo que solo esas galaxias tienen un HLR.

Las estimación de la mitad del radio luminoso fue hecho en arcosegundos y se hicieron gracias al mejor ajuste de GALFIT con banda H de HST (F160W) con su respectivo error.

Como se mencionó anteriormente no se pudo obtener todas las mitades de radio luminoso de todas las galaxias, en general solo se obtuvieron de algunas pertenecientes a VANDELS de la sobredensidades a $z=2.8$ y sus campos, las galaxias que poseen mitad de radio luminoso se describen en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.5: Integrantes de Sobredensidad $z=2.8$ y el campo con HLR

Sobredensidad $z=2.8$						
z_{peak}	N	N_{zspec}	$N_{ly\alpha}$	N_{campo}	$N_{campozspec}$	$N_{campoly\alpha}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
2.8	30	7	1	295	22	3

Nota: Esto es para el cuadro (4.5). (1) Peak de redshift de la sobredensidad. (2) Cantidad de galaxias miembros totales de la sobredensidad con HLR. (3) Cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad con redshift espectroscópico con HLR. (4) Cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad con emisión lyman alfa con HLR. (5) Cantidad de galaxias total del campo de la sobredensidad con HLR. (6) Cantidad de galaxias del campo de la sobredensidad con redshift espectroscópico con HLR. (7) Cantidad de galaxias del campo de la sobredensidad con emisión lyman alfa con HLR.

Anteriormente se había mencionado que el sSFR es una medida que puede determinar si una galaxia posee población estelar joven o vieja, pero que posee una ambigüedad en esta relación debido a que la masa puede haber sido acumulada durante el tiempo y obtener una baja sSFR. En una investigación reciente (Samir Salim et al. 2023) se propone superar esta ambigüedad con el diagrama Σ_{SFR} vs M^* , pero es necesario el radio isofotal para superar esta ambigüedad, aun así se propone una relación para calcular el radio isofotal en (Samir Salim et al. 2023) con el radio efectivo y la masa estelar, pero no será calculado en esta tesis.

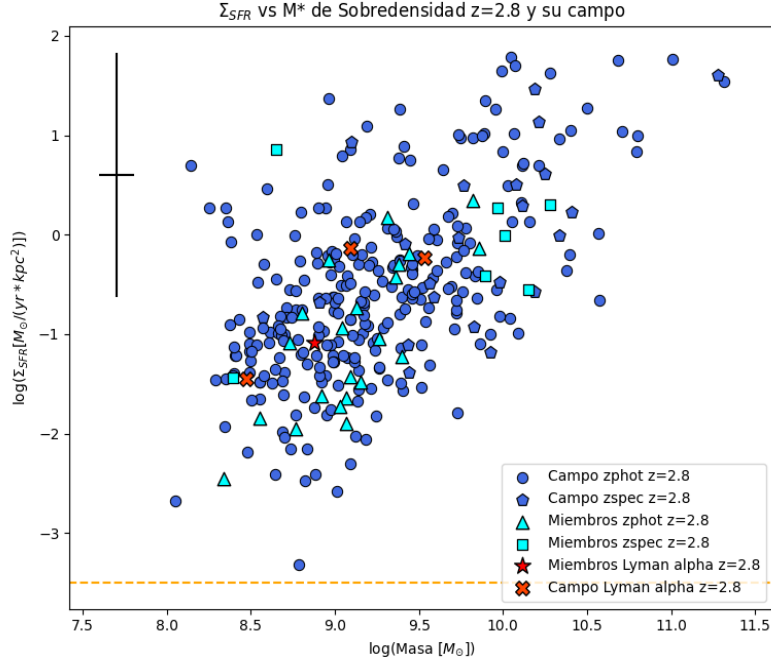


Figura 4.10: Gráfico de Σ_{SFR} vs M^* de la sobredensidades a $z=2.8$ y su campo. Los círculos azules galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift fotométrico. Los pentágonos azules galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Los triángulos celestes son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift fotométrico. Los cuadrados celestes son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Las estrellas rojas con las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa. Las cruces rojas son galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa. La línea punteada naranja es el límite para galaxias inactivas. EL error es el error promedio de todas las galaxias.

El análisis del gráfico de Σ_{SFR} vs M^* es un complemento del gráfico de sSFR vs M^* es lo muestra (Samir Salim et al. 2023) porque mientras el gráfico Σ_{SFR} vs M^* nos dirá como es la tasa de formación estelar en una cierta región de la galaxia, el gráfico de sSFR vs M^* nos dirá como es la formación estelar en la galaxia completa. Estos gráficos no necesariamente pueden mostrar altas formaciones estelares en los dos casos. Puede ser que las galaxias tengan una alta formación estelar en el centro y no en el borde o viceversa. Esto daría indicios de posibles efectos que afecten a la galaxia. A continuación se hace un análisis de el gráfico Σ_{SFR} vs M^* de la sobredensidades a $z=2.8$ y su campo.

La Figura (4.10) muestra Σ_{SFR} vs Masa estelar de la sobredensidad $z=2.8$ y su campo asociado, en general todas las galaxias siguen una tendencia inclinada hacia arriba, mostrando que en las galaxias entre más masa, masa densidad superficial de tasa de formación estelar y entre menos masa, menos densidad superficial de tasa de formación estelar es lo que se muestra en la Figura (4.10). Las galaxias del campo muestran mayores rangos de Σ_{SFR} y masa estelar (los valores más grandes y más pequeños los presentan galaxias del campo). Mientras que las galaxias miembros se mantienen con un grado de dispersión menos a las galaxias del campo. Existe una galaxia miembro que se sale de esta tendencia inclinada hacia arriba que tiene baja masa y alta densidad superficial de tasa de formación estelar. Las galaxias con emisión lyman alfa tienen valores similares al de las otras galaxias muy cercanos a la media de las demás galaxias de la sobredensidad a $z=2.8$ y su campo asociado. Un valor más bajo que la línea naranja punteada muestra galaxias que serían pasivas (valor $-3.5 <$ propuesto por Samir Salim et al. 2023), esta sobredensidad no tiene ninguna galaxia bajo la línea por lo tanto no tiene ninguna galaxia pasiva. Complementando con la Figura (4.10) esta la Figura (4.11) de $\log(sSFR)$ vs M^* que muestra que los miembros tienen una baja $\log(sSFR)$ con respecto al campo asociado que se contrasta con la Figura (4.10) que se muestra que la Σ_{SFR} son similares con la del campo, esto podría dar cuenta que las galaxias miembros podrían tener un efecto de ambiente que haga que tengan un alto crecimiento de masa, lo que provoca en una disminución en $\log(sSFR)$.

En la Figura (4.11) se muestra un gráfico de $\log(sSFR)$ vs M_* solo de las galaxias que poseen radio efectivo, se puede ver lo que se mencionaba es que las galaxias miembros se encuentran abajo en el gráfico en comparación con el campo, mientras el campo posee una alta formación estelar. En la Figura (4.10) los miembros son similares a las del campo, también se puede notar que algunas galaxias del campo poseen mayor formación estelar en el centro y en el borde, más que la mayoría de las galaxias incluyendo a las miembros y a las galaxias con emisión de lyman alfa.

Al ver los histogramas en la Figura (4.5) para la sobredensidad a $z=2.8$ vemos que las galaxias miembros tienen 2 peaks uno a $\log(sSFR) \sim -8.7$ y otro a $\log(sSFR) \sim -9.3$ que corresponde a cerca de la mitad de las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ en cada peak, mientras que el campo tiene un peak de la mayoría de las galaxias a $\log(sSFR) \sim -8.7$. El peak de galaxias miembros a $\log(sSFR) \sim -9.3$ no se muestra en la Figura (4.10)

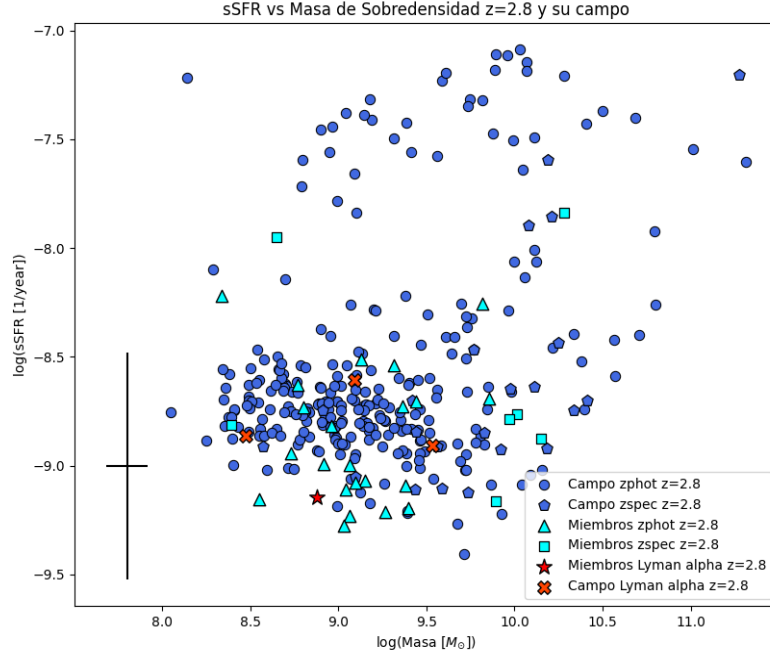


Figura 4.11: Gráfico de $\log(\text{SFR})$ vs M^* de la sobredensidades a $z=2.8$ y su campo. Los círculos azules son galaxias del campo de la sobredensidad $z=2.8$ con redshift fotométrico. Los pentágonos azules son galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Los triángulos celestes son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift fotométrico. Los cuadrados celestes son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico. Las estrellas rojas son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa. Las cruces rojas son galaxias del campo de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa. Las galaxias son solo las que tienen datos de HLR de [Van der Wel et al. 2012](#). EL error es el error promedio de todas las galaxias.

en la Σ_{SFR} tan claro como en la Figura (4.11). Al no haber peak claros de Σ_{SFR} y no diferencias grandes entre las distribuciones en la Figura (4.10) en relación de Σ_{SFR} de los miembros en comparación con el campo, indican que el efecto que produce una baja $\log(\text{sSFR})$ en la Figura (4.11) está relacionado con la masa.

Capítulo 5

Análisis de las sobredensidades lyman alfa

La sobredensidad a $z=2.8$ fue escogida de las diferentes sobredensidades debido a una investigación de [Z.Zheng et al. 2016](#) en cual realiza observaciones a un gran número galaxias con emisión lyman alfa, estas galaxias se encuentran ubicadas muy cercanas a la sobredensidad $z=2.8$ en Ra, Dec y redshift. En [Z.Zheng et al. 2016](#) se encontraron posibles sobredensidades con galaxias lyman alfa, en la cual la sobredensidad a $z=2.8$ tiene galaxias que están muy cercanas o dentro de ellas, entonces nos interesa saber si esas sobredensidades lyman alfa podrían tener alguna relación con la sobredensidad a $z=2.8$.

En [Z.Zheng et al. 2016](#) se realizan observaciones con 3 filtros de banda estrecha NB466 en un rango de redshift de 2.8 a 2.84, NB470 en un rango de redshift de 2.83 a 2.87 y NB475 en un rango de redshift de 2.88 a 2.92 que corresponden a la línea lyman alfa. Se encontró que existen sobredensidades solo de galaxias con emisión lyman alfa a en el rango de NB466 y NB470. Por lo que queremos ver si estas sobredensidad de LAE podrían tener alguna relación con la sobredensidad a $z=2.8$. Entonces consideramos los miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ en los rangos de redshift correspondientes a los filtro NB466 y NB470. En el siguiente cuadro se especifican la cantidad de galaxias ocupadas para estos rangos tanto de la sobredensidad $z=2.8$ como de las galaxias lyman alfa de NB466 y NB470:

Cuadro 5.1: Galaxias de la sobredensidad 2.8 y Z.Zheng 2016 en rango de redshift NB466

2.80 < z < 2.84				
$N_{peak2,8}$ (1)	N_{zspec} (2)	N_{phot} (3)	N_{LAE} (4)	NB466 _{zheng} (5)
10	4	6	0	90

Cuadro 5.2: Galaxias de la sobredensidad 2.8 y Z.Zheng 2016 en rango de redshift NB470

2.83 < z < 2.87				
$N_{peak2,8}$ (1)	N_{zspec} (2)	N_{phot} (3)	N_{LAE} (4)	NB470 _{zheng} (5)
12	1	10	1	45

Nota: Esto es para los cuadros (5.1) y (5.2). (1) Es la cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ en total en el rango de redshift de cada cuadro. (2) Es la cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con redshift espectroscópico en el rango de redshift de cada cuadro. (3) Es la cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad $z=2.8$ con redshift fotométrico con rango de redshift de cada cuadro. (4) Es la cantidad de galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ con emisión lyman alfa en el rango de redshift de cada cuadro. (5) Es la cantidad de galaxias LAE en el rango de redshift de cada filtro especificado NB466 o NB470 de zheng 2016.

Es interesante analizar la ubicación de estas sobredensidades de galaxias LAE que coincidentemente se encuentran muy cercanas en regiones en el espacio en Ra, Dec y incluso en redshift a la sobredensidad a $z=2.8$. Algo muy notable es que fueron encontrados de maneras, en la sobredensidad $z=2.8$ fue encontrada por un algoritmo y en la sobredensidades de LAE por observaciones a galaxias con emisión lyman alfa. Por lo que e las siguientes figuras se analiza como se ven espacialmente tanto las galaxias LAE con la sobredensidad a $z=2.8$ en los diferentes rangos de redshift.

En la Figura (5.1) se muestran las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ y las galaxias LAE de Z.Zheng en el rango de redshift en $z=2.80-2.84$, en cual se ve que las LAE de Z.Zheng 2016 están asociadas a la barra de color con el peso espacial (indicador de densidad) y se muestran de blanco a rojo, las galaxias que poseen un mayor peso espacial (las que están regiones más densas) están encerradas en una circunferencia grande que las contiene, la circunferencia grande marca la región de la sobredensidad de LAE definidos en Z.Zheng 2016, los tamaños y posiciones son solo aproximadas y el eje x se encuentra invertido a las mostradas a Z.Zheng 2016. Se puede ver que una sobredensidad de LAE está muy cerca de la sobredensidad podría estar ser una extensión de la sobredensidad a $z=2.8$ debido a su cercanía, además son regiones densas encontradas con diferentes métodos, por lo que en realidad podría ser extensiones de la sobredensidad a $z=2.8$, también se puede notar algunas galaxias cercanas en el lado izquierdo de la sobredensidad a $z=2.8$ que podrían estar siendo atraídas gravitacionalmente a la sobredensidad a $z=2.8$ debido a que las galaxias lyman alfa son típicamente menos masivas.

En la Figura (5.2) se muestra las galaxias de la sobredensidad a $z=2.8$ con las galaxias LAE de Z.Zheng 2016 a rango de redshift $z=2.83-2.87$, con solo las galaxias LAE de Z.Zheng 2016 asociada a la barra de color, se muestra una circunferencia grande que encierra las galaxias que tienen más peso espacial (las que están en regiones más densas) que

representa la sobredensidad de LAE encontrada en Z.Zheng 2016 a este rango de redshift. La sobredensidad de galaxias LAE a este rango de redshift podría ser parte de la sobredensidad a $z=2.8$, pero en especial a una pequeña “cola” de la sobredensidad a $z=2.8$ esta casi por completo dentro de la sobredensidad de galaxias LAE por lo que también es posible que esta sobredensidad LAE también esté unida a la sobredensidad a $z=2.8$.

Analizando las dos Figuras (5.1) y (5.2) podemos notar que en un futuro la sobredensidad a $z=2.8$ podría atraer aun más a las sobredensidades a LAE debido a que las galaxias LAE son de baja masa. Por otro lado con un análisis de los perfiles de línea Lyman alfa podríamos informar más sobre las características de este ambiente de esta región.

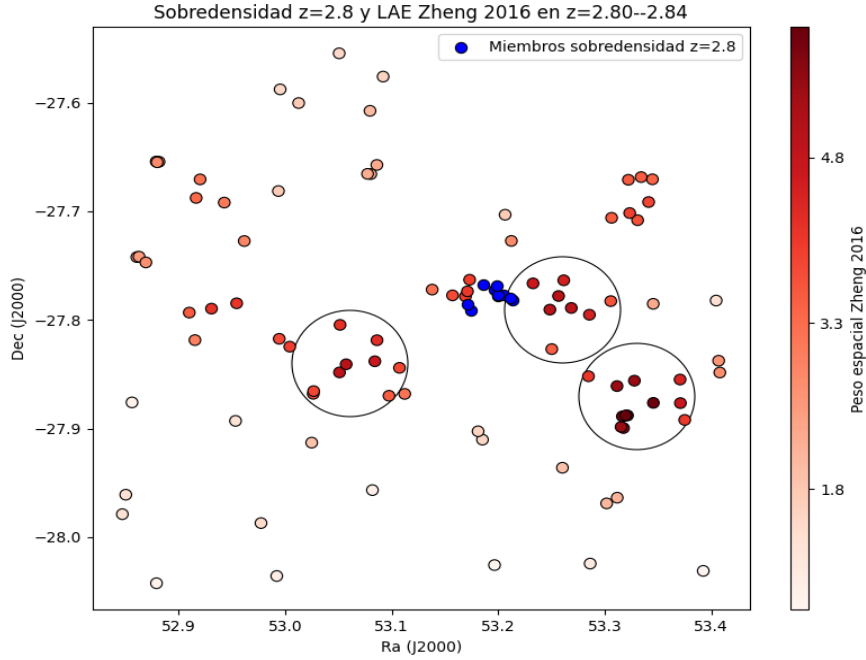


Figura 5.1: Distribución espacial de galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ y de las galaxias LAE de Zheng 2016 en rango de redshift $z=2.80-2.84$. La barra de color muestra el peso espacial que indica la densidad de las galaxias solo asociado a las galaxias de Zheng 2016 (círculos blancos o rojos).

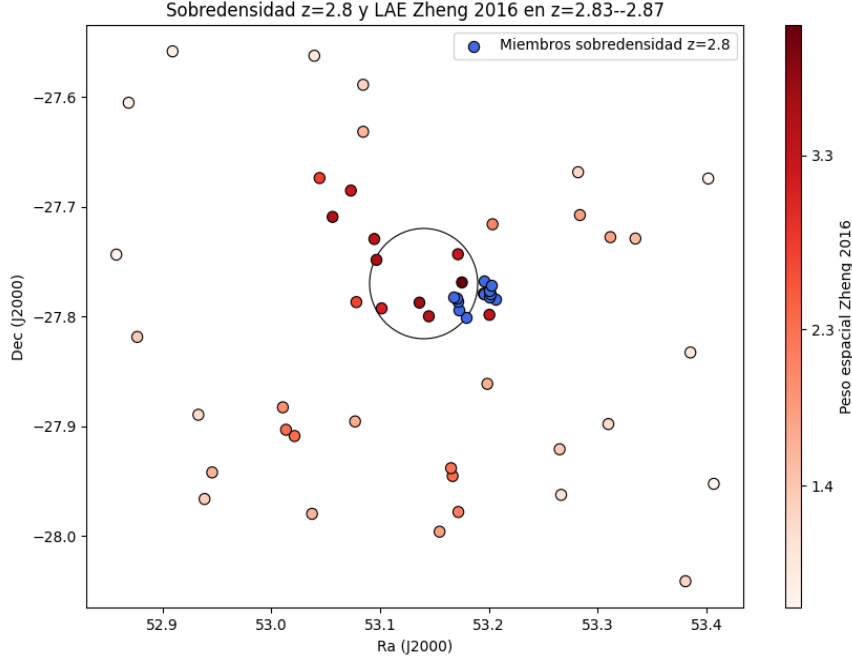


Figura 5.2: Distribución espacial de galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ y de las galaxias LAE de Zheng 2016 en rango de redshift $z=2.83-2.87$. La barra de color muestra el peso espacial que indica la densidad de las galaxias solo asociado a las galaxias de Zheng 2016 (los círculos blancos o rojos).

Nota: Esto es para las Figuras (5.1) y (5.2). Muestran la distribución espacial de las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ y LAE en cada rango de redshift especificado. Los círculos azules son las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ independientes a la barra de color. Los círculos con la barra de color de blanco a rojo, poseen un peso espacial que tiene que ver con la densidad en el espacio de las LAE definido en [Z.Zheng et al. 2016](#), color más blanco menos denso, color más rojo más denso. Los círculos grandes representan las sobredensidades de LAE mostradas en [Z.Zheng et al. 2016](#) en este caso el tamaño y posición es aproximado. En la Figura (5.1) hay tres sobredensidad de LAE que son los círculos grandes mostrados. En la Figura (5.2) solo hay una sobredensidad de LAE que es la que contiene galaxias dentro las demás solo referenciales de las mostradas en la Figura (5.1).

Capítulo 6

Evolución y SFRD de la sobredensidad a $z=2.8$

6.1. Evolución de la sobredensidad a $z=2.8$

Un aspecto importante para analizar es la posible evolución de la sobredensidad a $z=2.8$, es decir como la sobredensidad a $z=2.8$ puede representar a un protocúmulo y evolucionar en un cúmulo a redshift ~ 0 . Consideramos las investigaciones realizadas por [Chiang et al. 2013 y 2017](#), donde se muestran simulaciones de las etapas de evolución de un protocúmulo entre otros datos de como podría ser esta evolución.

Anteriormente en la sección (3.2.1) se cálculo la masa total de la sobredensidad a $z=2.8$ considerando un radio medio ($R_{meandist}$) el cual fue calculado con las coordenadas Ra y Dec de las galaxias de la sobredensidad. El radio está definido para un tamaño de volumen esférico observado (V_{esf}) que dependiendo el parámetro de bias (b) que debería estar el valor entre $2 < b < 4$ ([Durkalec et al. 2015](#)). Este valor b hace que se calcule un valor mínimo y máximo para el volumen, por lo que el volumen de la sobredensidad a $z=2.8$ debería estar dentro de estos dos volúmenes (V_{esf1} con $b=2$ y V_{esf2} con $b=4$). Al haber un rango para el volumen, hace que también exista un rango para la masa total del halo. La masa del halo entonces está entre $M_{tot}=2.88 \cdot 10^{12} M_{\odot} - 3.85 \cdot 10^{12} M_{\odot}$.

En la Figura (6.1) se muestra un gráfico de masa total vs redshift, en el cual se muestran simulaciones hechas en [Chiang et al 2013](#) que como resultado dan la evolución de los progenitores de cúmulos que llegan a convertirse en cúmulos. Se simularon 2832 cúmulos de galaxias con masa $> 10^{14} M_{\odot}$ a redshift $z=0$, por medio de estos cúmulos se rastreó los protocúmulos por medio de diferentes datos físicos como masa, tamaño, historia de formación estelar, sobredensidad de materia oscura, halo y galaxias. La Figura (6.1) la evolución de 3 categorías de protocúmulos según la masa del cúmulo a redshift $z=0$, cúmulo tipo Coma ($> 10^{15} M_{\odot}$), cúmulo tipo Virgo ($(3-10) \cdot 10^{14} M_{\odot}$) y cúmulo tipo Fornax ($(1.37-3) \cdot 10^{14} M_{\odot}$).

Se ha añadido al gráfico un pequeño rango de masa total $2.88 \cdot 10^{12} M_{\odot} < M_{tot} < 3.85 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ ubicado en $z=2.8$ que es el rango de la sobredensidad a $z=2.8$. En la Figura (6.1) se puede ver que no está en ninguno de las tres categorías entre las barras de errores, pero está muy cercana a estar dentro de la barra de error azul para seguir la evolución y llegar a ser un cúmulo de tipo Fornax.

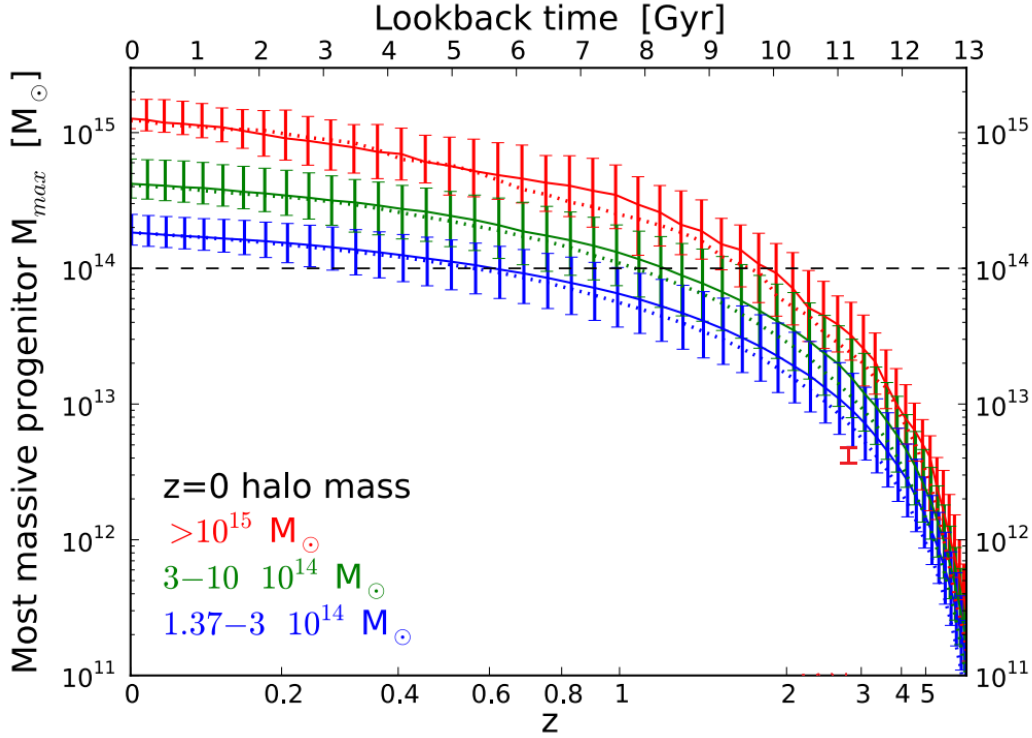


Figura 6.1: Este gráfico muestra la masa total vs redshift de las sobredensidades simuladas en Chiang et al 2013 que muestra la posible evolución de las sobredensidades según su masa total desde un redshift $z \sim 6$ hasta redshift $z=0$. El pequeño rango de masa total apartado de las líneas en $z=2.8$ de color rojo es la sobredensidad a $z=2.8$.

6.2. SFRD de la sobredensidad a $z=2.8$

En Chiang et al 2017 se toman 3819 cúmulos simulados con masa $> 10^{14} M_{\odot}$ a $z=0$ y se rastrea la evolución de las diferentes etapas en redshift de la evolución de la estructura de los protocúmulos llegando esta vez llegando hasta redshift $z \sim 10$. En la evolución de la estructura de los protocúmulos se consideran 2 diferentes radios y se analiza como cambian de forma estadística según el redshift. Uno de esos radios es R_{200} , el cual se define como el radio encierra la sobredensidad cuando posee 200 veces la densidad crítica del universo en $z=0$. Mientras que el otro es R_L que se define como el radio al que la probabilidad es 50 % de contener todos los miembros de la sobredensidad. Estos radios son importantes ya que

definen diferentes volúmenes de las sobredensidades, R_{200} define el volumen del núcleo del protocúmulo, R_L define el volumen del protocúmulo.

El cálculo de el volumen es necesario para calcular la densidad de tasa formación estelar (SFRD) que nos dice como es la formación estelar de la sobredensidad con respecto a su volumen.

En la sección (3.2.1) se cálculo el rango de volumen que podría tener la sobredensidad a $z=2.8$ que es $48.51 \text{ cMpc}^3 - 52.81 \text{ cMpc}^3$, por lo que la $\log(\text{SFRD})$ esta en un rango de $0.98^{+0.48}_{-0.66} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ cMpc}^{-3} - 1.02^{+0.48}_{-0.66} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ cMpc}^{-3}$.

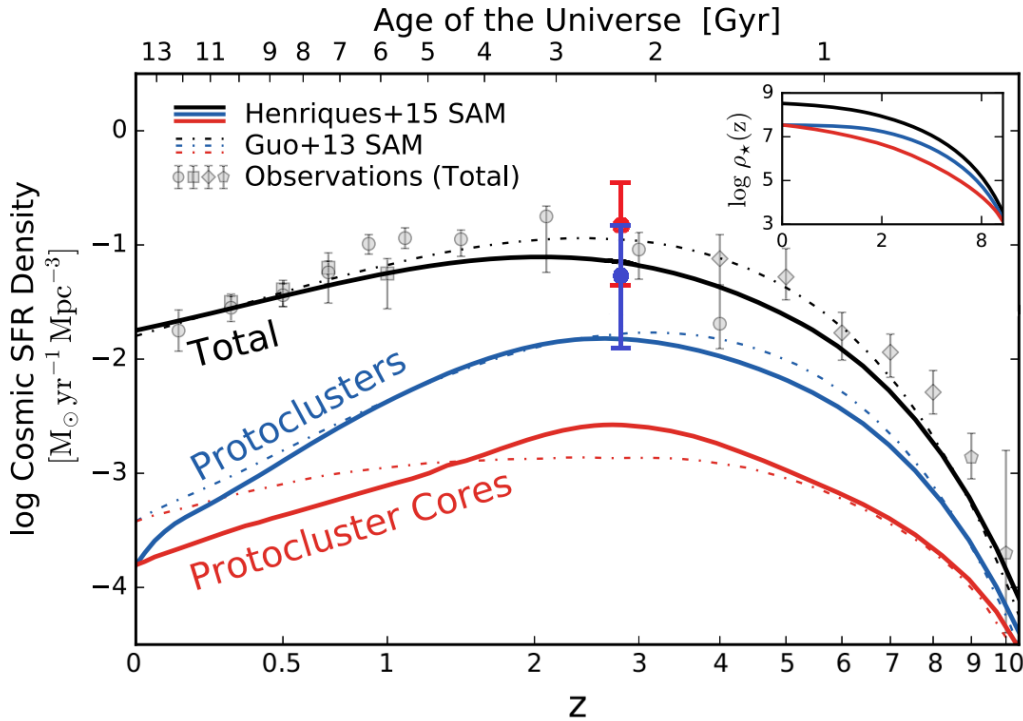


Figura 6.2: El gráfico de SFRD vs redshift de las sobredensidades simuladas en [Chiang et al 2017](#) en evolución a cada redshift. La línea azul es SFRD calculada con el volumen de R_L . La línea roja es SFRD calculado con el volumen de R_{200} . Mientras que la línea negra es el SFRD calculado para volúmenes con galaxias del campo. El punto con error marcado en rojo en $z=2.8$ es el SFRD calculado con el volumen cilíndrico con $R_{meandist}$ de la sobredensidad a $z=2.8$. El punto con el error marcado en azul en $z=2.8$ es el SFRD calculado con el volumen cilíndrico máximo con R_{cilmax} de la sobredensidad a $z=2.8$.

En la Figura (6.2) se muestra la $\log(\text{SFRD})$ vs redshift de [Chiang et al 2017](#) no se muestra el valor de $\log(\text{SFRD})$ para nuestra sobredensidad a $z=2.8$ debido a que el valor es muy alto, significa que las simulaciones consideraron otros valores para los volúmenes. No se puede saber el volumen real debido al redshift fotométrico es lo mejor que se puede

hacer con respecto al volumen. En las simulaciones al calcular un volumen como un volumen cilíndrico que considere la profundidad en redshift con el redshift fotométrico con su incertidumbre da un resultado muy diferente.

Al tomar un volumen cilíndrico con $R_{meandist}$, es decir como área de la observación multiplicado por el largo en cMpc que corresponde al rango total de redshift de la sobredensidad a $z=2.8$, recordando que calculamos con valores máximo y mínimo del valor de bias b da un rango de volumen de $3911.13 \pm 1355.77 \text{ cMpc}^3$ — $4257.28 \pm 1475.91 \text{ cMpc}^3$ que al calcular $\log(\text{SFRD})$ da un rango de $-0.91^{+0.43}_{-0.57} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ cMpc}^{-3}$ — $-0.88^{+0.43}_{-0.57} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ cMpc}^{-3}$, este valor es similar a las calculadas en las sobredensidades de las simulaciones como se muestra en la Figura (6.2) donde el volumen cilíndrico es marcado en rojo con una barra de error de una incertidumbre en redshift de 0.04. Se puede notar en la Figura (6.2) que un poco mayor que los cálculos para protocúmulos en las simulaciones. Considerando un tamaño aun más grande de un cilindro con radio máximo que se define como el radio que contiene a todas las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ desde el Ra y Dec del z_{peak} multiplicado por el largo en cMpc del rango total en redshift, da como resultado un rango de volumen $14094.47 \pm 4892.96 \text{ cMpc}^3$ — $14140.01 \pm 4908.77 \text{ cMpc}^3$. Al calcular $\log(\text{SFRD})$ da como resultado un rango de $-1.389^{+0.47}_{-0.60} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ cMpc}^{-3}$ — $-1.388^{+0.47}_{-0.60} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ cMpc}^{-3}$ el cual en la Figura (6.2) se marca en azul con una barra de error producto de la incertidumbre en redshift 0.04. Este último rango de $\log(\text{SFRD})$ es mucho mas parecido al entregado por las simulaciones para protocúmulos, pero que al mismo tiempo posee una incertidumbre aún más grande.

Los valores de SFRD que obtenemos indican que las estructuras como la nuestra indican que contribuyen significativamente a la tasa de formación estelar cósmica, aún tomando volúmenes grandes el $\log(\text{SFRD})$ es muy alto comparado con el de las simulaciones.

Capítulo 7

Conclusión

Este trabajo ha sido un análisis de la sobredensidad a $z=2.8$ ubicada en Chandra Deep Field-South (CDFs), identificada en [Guaita et al. 2020](#) que posee datos de literatura y de la survey VANDELS, el enfoque del análisis está relacionado con la formación estelar tanto de las galaxias miembros como de la sobredensidad en general, además con una posible evolución de la sobredensidad. Los principales hallazgos del análisis son:

1) Existen galaxias con una mayor densidad asociada en el área de observación como se muestra en la Figura (3.3) y que comparten mutuamente una ubicación en común, esto es lo que define a las galaxias pertenecen a sobredensidad a $z=2.8$, esta densidad asociada es mayor a 0.011 mientras que las galaxias del campo generalmente la mayoría tienen una densidad asociada menor que esta.

2) No se pudo encontrar región en el área de la observación con una formación estelar privilegiada que posea mayor SFR en comparación a otra. Las galaxias que poseen una SFR mayor se distribuyen de manera aleatoria, habiendo algunas en la sobredensidad como en el campo es lo que muestra la Figura (3.4). Las galaxias con SFR muy grande del orden de $11782[M_{\odot}/\text{Yr}]$ se encuentran en el campo.

3) Al hacer una comparación con los cúmulos de GOGREEN a redshift $z=1.034$ y $z=1.388$, la mitad de las galaxias de estos cúmulos tienen colores consistentes con galaxias pasivas según de gráfico de $(U-V)_{rest-frame}$ vs $(V-J)_{rest-frame}$ en la Figura (4.1), mientras que tanto las galaxias miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ y $z=3.1$ como las galaxias de sus campos no presentan indicios de galaxias pasivas a excepción de una galaxia del campo y un posible miembro de la sobredensidad a $z=2.8$ como muestra la Figura (4.1) haciendo una clara diferencia de galaxias pasivas y activas según el redshift.

4) Las galaxias con emisión lyman alfa de la sobredensidad a $z=2.8$ y $z=3.1$ y sus respectivos campo son más azules en $(U-V)_{rest-frame}$ vs $(V-J)_{rest-frame}$ con respecto a las demás galaxias como muestra la Figura (4.2). Se ubican en la región más cercana a la esquina inferior izquierda (la más azul).

5) En los histogramas de la Figura (4.5) los miembros de la sobredensidades poseen doble peak de $\log(s\text{SFR})$ mientras que las galaxias del campo solo posee un peak. La mayoría de las galaxias están dentro de estos peak. Se encontró un peak en común entre

las galaxias miembros de las dos sobredensidades y los campos asociados a estas con un valor de $\log(\text{sSFR}) \sim -8.7$, el segundo peak de los miembros es en $\log(\text{sSFR}) \sim -9.2$, las dos sobredensidades lo poseen en común. Además las galaxias que poseen mayor sSFR están en el campo mostrando incluso un pequeño mini peak en el campo asociado a la sobredensidad a $z=2.8$.

6) En los histogramas de la Figura (4.5) los miembros de los cúmulos de GOGREEN posee $\log(\text{sSFR})$ muy bajas en comparación con las sobredensidades a redshift ~ 3 y sus campos asociados. Por lo que los miembros de los cúmulos de GOGREEN poseen en general poca formación estelar.

7) En la Figura (4.8) se analiza la edad de las galaxias con respecto al tiempo del episodio de formación estelar, mostrando como resultado que las galaxias de las sobredensidades a $z \sim 3$ y sus respectivos campos asociados aún no terminan su episodio de formación estelar en su mayoría, habiendo algunas pocas excepciones, mostrando también que las galaxias miembros como las del campo les queda un tiempo similar para terminar el episodio y esto no depende de la formación estelar.

8) Al analizar la $\log(\text{edad}/\tau)$ solo las galaxias miembros de la sobredensidades a $z \sim 3$ y los cúmulos de GOGREEN en la Figura (4.9), se ve que los miembros de las sobredensidades a $z \sim 3$ en general les falta un tiempo en común para terminar el episodio de formación estelar, habiendo algunas galaxias principalmente de la sobredensidad $z=3.1$ que ya terminaron ese episodio de formación estelar, en cambio los miembros de GOGREEN ya todos terminaron el episodio de formación estelar, además mostrando que tienen una baja $\log(\text{sSFR})$ en comparación con los miembros de las sobredensidades.

9) En [Salim et al. 2023](#) se concluyo que el gráfico $\log(\text{sSFR})$ vs masa se debe analizar en conjunto con el gráfico Σ_{SFR} vs masa. En el gráfico de $\log(\text{sSFR})$ vs masa en la Figura (4.11) muestra que los miembros de la sobredensidad a $z=2.8$ tienen baja $\log(\text{sSFR})$ en comparación con las galaxias de su campo asociado en el rango entre -9 y -9.5, pero el gráfico de Σ_{SFR} vs masa en la Figura (4.10) muestra de que en realidad en el centro de las galaxias la formación estelar es similar con las galaxias del campo asociado, por lo que al analizar en conjunto los grafico nos damos cuenta de que las galaxias miembros de la sobredensidad tienen una mayor concentración de masa, su masa podría haber crecido muy rápidamente debido a un intenso episodio de formación estelar esto podría ser un efecto de ambiente. El análisis de morfología y del perfil de sSFR de los miembros podría aclarar este punto.

10) Como se muestra en la Figura (5.1) en el rango de redshift $z=2.80 - 2.84$, la sobredensidad $z=2.8$ está junta con una sobredensidad de galaxias LAE que esta cercana a ella, por lo que en realidad la sobredensidad de galaxias LAE podría ser una extensión de la sobredensidad a $z=2.8$, además en la “cola” de la sobredensidad a $z=2.8$ se ven unas galaxias LAE que podrían estar siendo atraídas gravitacionalmente hacia la sobredensidad a $z=2.8$, debido a que las galaxias LAE son menos masivas. En tanto en la Figura (5.2) se muestra otra sobredensidad de galaxias LAE en el rango de redshift $z=2.83 - 2.87$ que está cercana con la sobredensidad $z=2.8$ por lo que también podría ser otra extensión de la sobredensidad a $z=2.8$, esto podría tener algún efecto en el ambiente, pero se requiere algún análisis de perfiles lyman alfa que nos dé esta información.

11) En la Figura (6.1) se muestra la evolución de las sobredensidades simuladas en [Chiang et al. 2013](#), en la misma figura se muestra también la masa estimada de la sobredensidad a $z=2.8$ que está fuera de los rangos de masa de las simulaciones, pero aún así esta muy cerca en masa de posiblemente convertirse en un cúmulo tipo Fornax o en un cúmulo de masa $1 \cdot 10^{14} M_{\odot}$ a $z=0$.

12) En la Figura (6.2) se muestra la SFRD de sobredensidades simuladas en [Chiang et al. 2017](#) relacionadas con la evolución de la sobredensidades. Encontramos que estructuras como la sobredensidad a $z=2.8$ podrían contribuir significativamente a la densidad de tasa de formación estelar cósmica, esto nos indica que a $z > 2$ que la formación estelar se desarrolla significativamente en regiones sobredensas donde las galaxias pueden aumentar rápidamente su masa.

Bibliografía

- [1] Balogh 2021 MNRAS, 500, 358B
- [2] Brammer 2008 ApJ, 686, 1503B
- [3] Carnall 2019 MNRAS, 490, 417C
- [4] Castellano 2007 ApJ, 671, 1497C
- [5] Chevallard 2016 MNRAS, 462, 1415C
- [6] Chiang 2013 ApJ, 779, 127C
- [7] Chiang 2017 ApJ, 844L, 23C
- [8] Cotini 2016 MNRAS, 456, 1924C
- [9] Cucciati 2014 A&A, 570A, 16C
- [10] Durkalec 2015 A&A, 583A, 128D
- [11] Franck 2016 ApJ, 833, 15F
- [12] Garilli 2021 A&A, 647A, 150G
- [13] Gladders 2000 AJ, 120, 2148G
- [14] Grogin 2011 ApJS, 197, 35C
- [15] Gronwall 2021 AAS, 23812004G
- [16] Guaita 2017 A&A, 606A, 19G
- [17] Guaita 2020 A&A, 640A, 107G
- [18] Hinton 2016 A&C, 15, 61H
- [19] Kang 2015 JKAS, 48, 21K
- [20] Kriek 2009 ApJ, 700, 221k

- [21] Kubo 2013 ApJ, 778, 170K
- [22] Kurk 2013 A&A, 549A, 63K
- [23] Lausen 2011 ApJ, 728, 52L
- [24] Lemaux 2014 A&A, 572A, 41L
- [25] McLure 2018 MNRAS, 479, 25M
- [26] Miller 2018 Nature, 556, 469M
- [27] Muldrew 2015 MNRAS, 452, 2528M
- [28] Pentericci 2018 A&A, 616A, 174P
- [29] Salimbeni 2009 A&A, 501, 865S
- [30] Salim Samir 2023 arXiv231011493S
- [31] Santini 2015 ApJ, 801, 97S
- [32] Steidel 2005 ApJ, 626, 44S
- [33] Trevese 2007 A&A, 463, 853T
- [34] Van der Burg 2020 A&A, 638A, 112V
- [35] Van der Wel 2012 ApjS, 203, 24V
- [36] Venemans 2007 A&A, 461, 823V
- [37] Verhamme 2008 A&A, 491, 89V
- [38] Williams 2009 ApJ, 691, 1879W
- [39] Zheng 2016 ApJS, 226, 23Z