

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y ASTROFÍSICA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Código de TFG: FTA22

Análisis de la formación estelar de galaxias en filamentos usando el
cartografiado GAMA

Analysis of star formation of galaxies in filaments using the GAMA survey

Supervisor/es: Maritza Lara-López

Miguel Fernández Soler

Grado en Física

Curso académico 2024-25

Convocatoria Ordinaria

Calificación: 9.1

Análisis de la formación estelar de galaxias en filamentos usando el cartografiado GAMA

Resumen:

El propósito de este trabajo es el análisis de la formación estelar en las diferentes estructuras del universo de acuerdo con la cosmología actual. Para ello utilizaremos el cartografiado GAMA, que contiene los datos de cientos de miles de galaxias. A través de la evaluación de las distintas propiedades de estas como su morfología, metalicidad o color, se pueden entender mejor la naturaleza de los procesos de formación de nuevas estrellas. También se emplearán trazadores de SFR para diferenciar en cuáles de nuestras galaxias observamos formación estelar, entre otras técnicas. En definitiva, con esta investigación se pretende entender la naturaleza de las galaxias, dependiendo del entorno donde se encuentren, para desarrollar una mayor comprensión de este tipo de fenómenos que, aún hoy en día, siguen provocando debates en la cosmología moderna.

Abstract:

This project aims to analyze star formation processes among the different structures in the universe in agreement with current studies. To do so, we will use GAMA mapping, which collects data from several hundred thousand galaxies. By analyzing properties such as morphology, metallicity, and color, we will improve our understanding of star formation behavior. We will also use SFR tracers to identify galaxies with star formation outbreaks, as well as other techniques. Finally, this investigation seeks to deepen our understanding of galaxies depending on their environments, contributing to our knowledge of these phenomena, which still manage to present challenges in modern cosmology.

Índice

1. Introducción	4
2. Objetivos	6
3. Metodología	7
3.1. Filtrado de datos	7
3.2. Diagrama BPT	8
3.3. Cálculo de la tasa de formación estelar	10
4. Resultados	11
4.1. Relación Masa-SFR	11
4.2. Morfología	13
5. Discusión	15
6. Conclusión	16
6.1. Líneas futuras de investigación	16

1. Introducción

El universo está lleno de galaxias, cada una con miles de millones de estrellas. Todas estas galaxias se agrupan en diferentes estructuras en el universo debido a la interacción gravitatoria entre las mismas, dando así lugar a filamentos, *voids* y *tendrils*. Los filamentos son canales de transporte de materia a lo largo del universo que representan la estructura más importante en lo referente a la distribución de galaxias. La mayoría de estos contienen una densidad de materia notable y actúan como ramas entre sí, formando una especie de red que recibe el nombre de *Cosmic Web* (Feldbrugge y Weygaert 2025). Por otro lado, los *tendrils* son estructuras que típicamente contienen entre 5 o 6 galaxias distribuidas en un entorno de $10 h^{-1}\text{Mpc}$, y que conectan los filamentos con otras regiones, que pueden ser otro filamento o terminar en *voids*. Finalmente, los *voids* se definen como regiones que cubren un rango de entre 20 y $50 h^{-1}\text{Mpc}$ y que tienen una densidad de galaxias un 10 % menor a la típica de un campo de galaxias (Alpaslan et al. 2014). Donde h denota el parámetro reducido de Hubble.

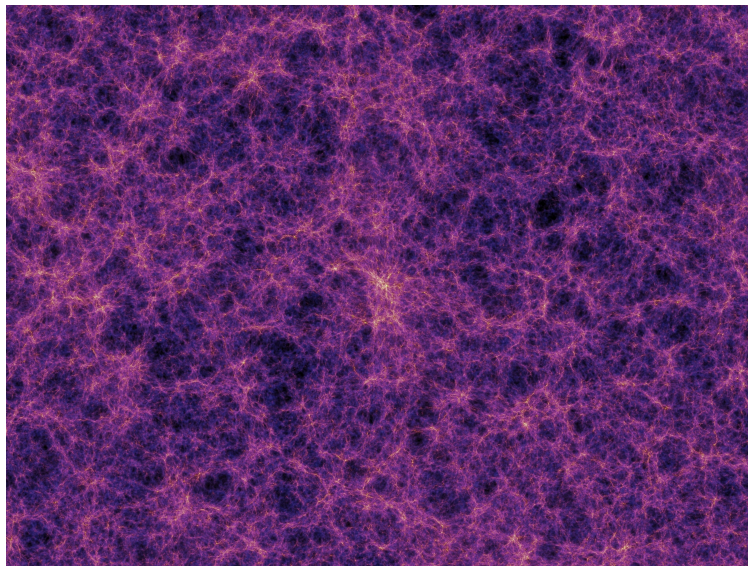


Figura 1: Impresión artística de la Red Cósmica por Volker Springel (Max Planck Institute for Astrophysics) et al.

En la Figura 1, las regiones de menor densidad están representadas como manchas oscuras, mientras que los filamentos y los *tendrils* se ven como pequeñas cuerdas entrelazadas entre sí.

A lo largo de esta Red Cósmica existen varios tipos distintos de galaxias. Para clasificarlas, típicamente se atiende a su morfología según el estudio que realizó Hubble (1926), donde se distinguen cuatro tipos principales: elípticas (E), lenticulares (S0), espirales (S) e irregulares (Irr). Posteriormente, realizaremos un estudio de la morfología por medio de los índices de Sérsic, para caracterizar las galaxias y observar la naturaleza de cada galaxia según el tipo al que correspondan.

Para entender la influencia del impacto del entorno en la tasa de formación estelar (SFR) atendemos al trabajo de Sotillo-Ramos et al. 2021. En este, se llegan a varias conclusiones que podremos comprobar más adelante al comparar entre filamentos, *tendrils* y *voids*. La primera y más importante es que las galaxias presentes en entornos poco densos muestran un aumento significativo en la SFR. Por otro lado, en entornos más densos también existe un leve aumento de la tasa de formación estelar, pero este es mucho menos importante.

Podemos ahora conectar el concepto de entorno de alta densidad con el de los filamentos. Así pues, encontramos que las galaxias en filamentos son mucho más comunes en el universo, y

podemos conocer un poco mejor sus características. Ayudándonos de los trabajos de Zarattini y Aguerri (2025), y Piotrowska et al. (2021), podemos realizar un primer acercamiento al estudio de estos. Lo primero que podemos decir de las galaxias presentes en ellos es que son mucho más propensas a interactuar que aquellas que se encuentren en regiones menos pobladas del universo. Estas interacciones pueden propiciar fusiones húmedas, con gas, que dan lugar a formación estelar en un inicio, pero que también pueden dar lugar a otro tipo de fenómenos como la activación de los agujeros negros supermasivos de sus núcleos. Esto último puede inhibir la formación estelar en las galaxias por procesos de retroalimentación, es decir, el gas puede calentarse debido al AGN y apagar la formación estelar ya que esta se da por el colapso de nubes frías. Así pues, podemos predecir que las galaxias de tipos tardíos y azules en filamentos tendrán una menor SFR de la esperada, y que las galaxias de *voids* y *tendrils*, que sufren un menor número de interacciones, se verán menos afectadas por los AGNs consiguiendo así un mayor número de episodios de formación estelar.

Otro factor que también juega un papel importante en la formación estelar de las galaxias es la masa. Esta relación Masa-SFR se estudia en el artículo de Garduño et al. (2021). Como muestra para este trabajo se utilizan 4636 pares de galaxias, llegando a las siguientes conclusiones. En primer lugar, se observa que las galaxias con un mayor número de compañeras tienen una SFR más elevada. Al estar observando objetos en pares, las densidades en que se encuentran estas son bajas, por lo que un aumento de la formación estelar cumple con lo visto anteriormente. Sin embargo, lo importante de este artículo es que, a mayor masa, también se encuentra un aumento de la formación estelar. Esto quiere decir que en las galaxias más masivas esperamos notar una tasa de formación estelar mayor cuando estas se encuentran en pares.

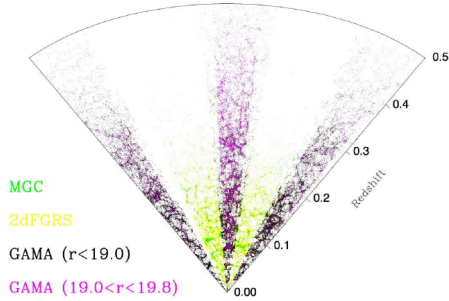
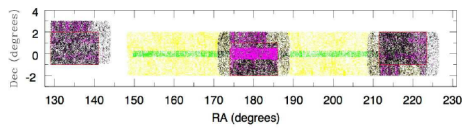
Por otra parte, en el artículo de Lara-López et al. (2013) se tratan cada una de las galaxias por separado en lugar de por pares, encontrando que esta relación también se cumple para todas las galaxias clasificadas como *'Star Forming'* en general. Observamos que, a mayor masa para estas galaxias, también encontramos una mayor tasa de formación estelar para todos los z estudiados, si bien es cierto que a mayores z , se encuentran mayores SFR. En este artículo también se estudia cómo varía la sSFR con la masa. La sSFR se define como la razón entre tasa de formación estelar y la masa de una galaxia. Lo que se encuentra en este estudio es que, contrariamente a lo que acabamos de ver, las galaxias de menor masa aumentan su contenido de estrellas a un mayor ritmo en proporción a las más masivas. Este fenómeno se interpreta como una evidencia del *'downsizing'*, que significa que las galaxias menos masivas formaron sus estrellas más tarde, mientras que las más masivas formaron sus estrellas al inicio del universo.

Volviendo al experimento GAMA (*Galaxy And Mass Assembly*), inicialmente se planteó como un trabajo cuyo objetivo era mapear una región de bajo redshift para poder probar el modelo cosmológico CDM y las extensiones semianalíticas que modelan la formación y evolución de galaxias en el rango kpc-Mpc. GAMA contiene imágenes de alta resolución en u-i del VST, en Y-K de VISTA, y espectroscopía de AAOmega, así como datos sobre regiones en el infrarrojo y HI para más de 250000 galaxias en un campo de 200 deg^2 (Baldry et al. 2007).

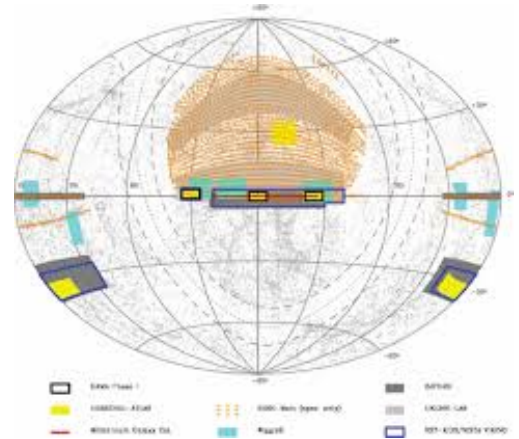
Así pues, recoge información del siguiente campo, recopilada en el artículo de S. P. Driver et al. (2011) y reflejada en el Cuadro 1:

Field	RA (J2000) ($^{\circ}$)	Dec. (J2000) ($^{\circ}$)	Area (deg^2)	Depth (mag)
G09	129.0...141.0	+3.0...-1.0	12×4	$r_{\text{pet}} < 19.4$
G12	174.0...186.0	+2.0...-2.0	12×4	$r_{\text{pet}} < 19.8$
G15	211.5...223.5	+2.0...-2.0	12×4	$r_{\text{pet}} < 19.4$

Cuadro 1: Coordenadas y magnitudes regiones ecuatoriales GAMA.



(a) Simon P. Driver (2008)



(b) S. P. Driver et al. (2011)

Figura 2: Cartografiado GAMA

En la Figura 2, observamos las regiones estudiadas por GAMA. Además, la resolución a la que trabaja el AAT, permite resolver entre el bulbo y disco de las galaxias, dando así la posibilidad de caracterizar las galaxias por su morfología, ya que también es clave en los procesos de formación estelar.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estudiar las diferencias en la formación estelar para las galaxias en filamentos, *tendrils* y *voids*, utilizando para ello los datos proporcionados por el cartografiado GAMA y el catálogo espectroscópico GANDALF. Sus iniciales son por *Gas AND Absorption Line Fitting*, y su objetivo es separar la contribución de las estrellas y las líneas de emisión de los espectros observados.

Así pues, y una vez definido GANDALF, los objetivos de esta investigación son:

- Obtener una muestra de galaxias clasificadas como *Star Forming*, aplicando filtros sobre los datos espectroscópicos disponibles y empleando criterios físicos fundamentados, como la relación señal/ruido y la validez de los flujos de emisión.
- Distinguir las galaxias clasificadas como *Star Forming* mediante el diagrama BPT-NII.
- Estimar la tasa de formación estelar para las galaxias seleccionadas, aplicando correcciones por extinción y absorción, y empleando como trazador principal la línea de emisión $H\alpha$.
- Clasificar las galaxias según la estructura en la que se encuentran, con el objetivo de estudiar cómo influye el entorno en la formación estelar.
- Analizar la relación Masa-SFR.
- Estudiar la morfología de las galaxias dependiendo de su entorno.

Mediante el cumplimiento de estos objetivos, esperamos aportar una visión detallada sobre el impacto del entorno en los procesos de formación estelar, con el fin de entender mejor cómo funciona la estructura a gran escala del universo.

3. Metodología

3.1. Filtrado de datos

En primer lugar, necesitamos una muestra de datos fiable de nuestros catálogos espectroscópicos, que tienen información acerca de los flujos de las líneas de emisión que necesitamos para llevar a cabo el análisis. El flujo de estas líneas de emisión se mide mediante un modelo Gaussiano y un ajuste a un polinomio de primer grado utilizando un algoritmo de Markwardt. Las líneas se ajustan por grupos. Aquellas que están aisladas sin líneas juntas a ellas en un rango de 50 Å se pueden ajustar individualmente. Por otra parte, las líneas que están muy pegadas como $[NII]\lambda 6583$ y $H\alpha$, pueden aparecer mezcladas, por lo que se ajustan simultáneamente pero con parámetros diferentes para cada línea. Por último, las líneas que pertenecen a un doblete, como $[OIII]$, se ajustan también simultáneamente y se impone la condición de que presenten la misma dispersión de velocidades. Cada grupo se ajusta dentro de un rango espectral que va desde los -50 Å de la línea más azul del grupo, a los +50 Å de la línea más roja del grupo. Los errores de estas líneas se tienen en cuenta durante el ajuste, y los malos píxeles se marcan como datos ausentes (Rodrigues et al. 2016).

GAMA está formado por multitud de catálogos, cada uno conteniendo una información diferente. Para nuestro análisis, haremos uso de los siguientes: 'GalacticExtinctionv03', 'FilGalsv02', 'TendrilGalsv02', 'VoidGalsv02', 'InputcatAv07', 'GANDALF', 'DistanceFramesv14', 'kcorr_auto_z00v05', 'StellarMassesLambdarv20' y 'SersicCatAllv07'.

El catálogo 'GalacticExtinctionv03' contiene datos sobre la extinción galáctica en todas las bandas de GALEX, SDSS, UKIDSS y VIKING listados en los catálogos 'InputCatAv06', 'TilingExtrav02' y 'SpStandardsv09'. Donde la extinción para cada banda 'x' se ha calculado como:

$$A_x = (A_x/E(B - V)) \cdot E(B - V) \quad (3.1)$$

Y donde el valor de $E(B - V)$ o también llamado exceso de color se ha tomado del artículo de Schlegel et al. (1998).

El catálogo 'InputcatAv07' contiene datos del catálogo GAMA II SDSS que cubre la región ecuatorial entre 8h-15h, y cuyos límites en magnitudes son $r_{petro} < 20.0$ o $r_{model} < 20.6$.

El catálogo 'DistanceFramesv14' contiene los redshifts de nuestros objetos convertidos a diferentes marcos de referencia.

El catálogo 'kcorr_auto_z00v05' contiene las correcciones K para las bandas FUV y NUV de GALEX, ugriz de SDSS y YJHK de UKIDSS para todas las galaxias con redshifts dentro de las regiones ecuatoriales de GAMA.

Ahora, el catálogo 'StellarMassesLambdarv20' es uno de los más extensos, y contiene información sobre las masas estelares, fotometría en reposo y otros datos auxiliares para los ajustes a las poblaciones estelares con $0 < z < 0.65$ y longitudes de onda en reposo de entre 3000 y 11000 Å.

Por último, los catálogos 'FilGalsv02', 'TendrilGalsv02' y 'VoidGalsv02' contienen la clasificación de los diferentes objetos encontrados en las regiones ecuatoriales observadas según la estructura a la que pertenecen.

Una vez definidos todos estos catálogos, construimos uno personalizado por medio del software libre TOPCAT, que permite mezclar estos catálogos para obtener solamente la información más relevante de cada uno de ellos. En estos catálogos, cada galaxia recibe un CATAID que permite identificarla de manera universal. En el caso del catálogo GANDALF, esta identificación es diferente, y para mezclarse con nuestro catálogo principal lo hacemos por coordenadas de ascensión recta (RA) y declinación (DEC). Cuando ya hemos obtenido un catálogo maestro principal, podemos comenzar con el filtrado de datos.

El primer paso para comenzar con el análisis es construir un diagrama BPT-NII, que será definido en la siguiente subsección, a partir de los datos que nos proporcionan los catálogos disponibles.

Inicialmente, contamos con 191865 galaxias. No obstante, necesitamos aplicar una serie de filtros para garantizar que nuestra muestra de datos sea fiable. Entre otras cosas, las galaxias observadas tienen datos sobre los espectros con una gran cantidad de ruido. Por tanto, es necesario seleccionar solo aquellas galaxias con una buena señal a ruido (S/R).

La primera condición que deben cumplir nuestras galaxias es que estos cocientes sean ambos mayores o iguales a 0, dejando nuestra muestra en 109045 objetos. Así nos aseguramos de evitar contar con las galaxias cuya información no se conoce y que podría falsear los resultados. En este tipo de catálogos, se utilizan medidas "dummy" para indicar cuándo no se conoce algún dato sobre las mismas. En este caso, las medidas del catálogo GANDALF toman valores -999 o similares. Así pues, imponiendo que los flujos sean > 0 eliminamos este tipo de medidas.

El siguiente paso es eliminar las galaxias con un alto contenido de ruido, para ello, calculamos la señal a ruido (S/R) de cada galaxia por medio de la expresión:

$$S/R = \frac{F_x}{\Delta F_x} \quad (3.2)$$

Donde F_x es el flujo de la línea de interés y ΔF_x su error. Así pues, imponemos que este resultado sea ≥ 3 , dejando como resultado un total de 41770 galaxias.

Finalmente, hemos reducido el tamaño de nuestra muestra a estudiar de 200000 galaxias a apenas 40000. De este modo, ya podemos pasar a la construcción del Diagrama BPT-NII.

Gal. Iniciales	Flux ≥ 0	S/R > 3
191865	109045	41770

Cuadro 2: Resultados tras el filtrado de datos

Como podemos observar en el Cuadro 2, nos hemos quedado solamente con el 21.77% de nuestros objetos iniciales, por lo que el análisis de ahora en adelante contendrá un mayor nivel de confianza.

3.2. Diagrama BPT

Para realizar el diagrama BPT-NII, comparamos el cociente de los flujos de $[OIII]\lambda 5007/H\beta$ con el de $[NII]\lambda 6583/H\alpha$, por lo que dentro del catálogo GANDALF solo nos hace falta la información referente a estas líneas. Por un lado, este cociente dará una idea del origen de la radiación de nuestros objetos. Como sabemos, esperamos una mayor tasa de formación estelar para aquellas galaxias que sean más azuladas y con un mayor contenido de gas (hidrógeno).

Una vez calculados estos cocientes, podemos también obtener los siguientes límites a partir de las líneas definidas en los artículos de Kauffmann et al. (2003) y Kewley et al. (2001), que se han calculado mediante las siguientes expresiones:

$$0.61/(\log([NII]/H\alpha) - 0.05) + 1.3 < \log([OIII]/H\beta) \quad (3.3)$$

$$0.61/(\log([NII]/H\alpha) - 0.47) + 1.19 > \log([OIII]/H\beta) \quad (3.4)$$

Ahora, representando los logaritmos de los cocientes de $[NII]\lambda 6583/H\alpha$ y $[OIII]\lambda 5007/H\beta$, obtenemos el diagrama BPT-NII, que observamos en la Figura 3:

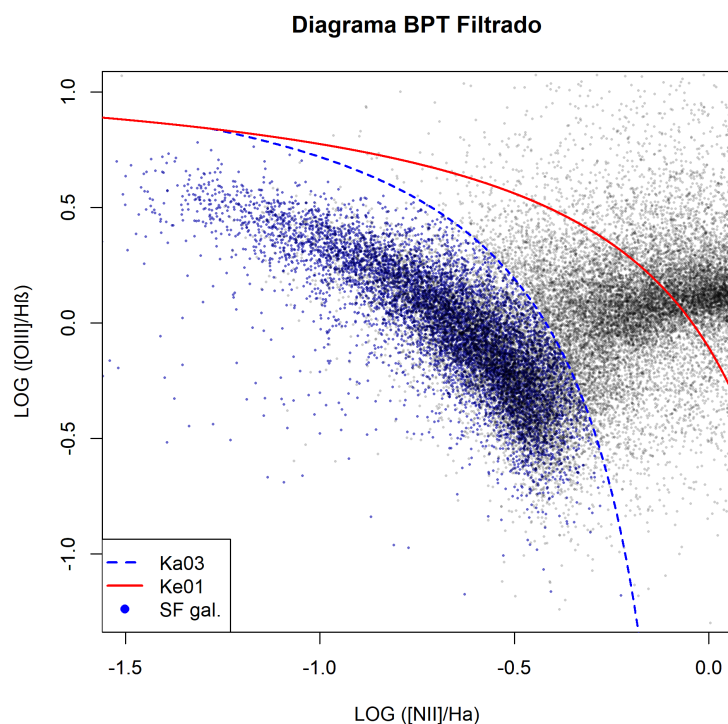


Figura 3: Diagrama BPT para galaxias '*Star Forming*'

En la Figura 3 distinguimos las galaxias clasificadas como *Star Forming*, que son aquellas encerradas por debajo de la línea discontinua.

El diagrama BPT tiene como función principal separar las galaxias clasificadas como *Star Forming* de los Núcleos Activos de Galaxias (AGN), que se estudian por otros métodos, ya que pueden o bien favorecer la formación estelar, o bien inhibirla en un fenómeno conocido como *quenching*. En el caso de la Figura 3, los AGN son aquellas galaxias que se encuentran por encima de la línea roja. Estos objetos presentan un mayor nivel de radiación, que solo es explicable mediante la presencia de un AGN.

El propósito de estas figuras es precisamente filtrar los objetos en función de los diferentes mecanismos de ionización que predominan en cada uno de ellos. La relación $[OIII]\lambda 5007/H\beta$ nos indica el nivel de ionización y la temperatura del gas, mientras que el cociente $[NII]\lambda 6583/H\alpha$ da una idea de la dureza de la radiación.

En el artículo original de Baldwin, Phillips y Terlevich (1981), los autores explican que los mecanismos de ionización que predominan en el universo son: la radiación proveniente de estrellas O y B, la radiación proveniente de un continuo regido por una ley de potencias o el calentamiento por ondas de choque. De estas, la que da una mayor información acerca de la formación estelar es la primera. Esto se debe a que las estrellas O, B son en su gran mayoría estrellas jóvenes y muy masivas, cuya presencia solo es posible si están ocurriendo procesos de formación estelar. Para entenderlo mejor, típicamente, las estrellas de esta clasificación espectral viven del orden de 3~30 millones de años, que son tiempos muy cortos en comparación con las escalas empleadas en la extragaláctica. Así pues, si se encuentra radiación proveniente de estas, han de existir procesos que estén dando lugar a su nacimiento. De aquí la importancia de realizar en primer lugar esta separación.

Con esto último podemos dar por finalizado el filtrado inicial de los datos, aunque para las siguientes secciones harán falta más filtros adicionales para poder realizar correctamente los cálculos

necesarios.

3.3. Cálculo de la tasa de formación estelar

A continuación, podemos realizar una estimación de la SFR para las galaxias clasificadas como *Star Forming*, que son aquellas por debajo de la línea Ka03.

La tasa de formación estelar o SFR se define como el ritmo por el cual el gas presente en las galaxias se transforma en estrellas. O dicho de otro modo, la cantidad de gas que se transforma en estrellas por unidad de tiempo. Se mide en M_{\odot}/yr .

Así pues, comenzamos corrigiendo la luminosidad en $H\alpha$ por los efectos del medio intergaláctico y la absorción estelar, utilizando la siguiente relación de Hopkins et al. (2003):

$$L_{H\alpha,int} = EW_{H\alpha} \cdot 10^{-0.4 \cdot (M_r - 34.10)} \cdot \frac{3.0 \cdot 10^{18}}{[6564.61(1+z)]^2} \cdot \left(\frac{F_{H\alpha}/F_{H\beta}}{2.86} \right)^{2.38} \quad (3.5)$$

Donde z es el redshift, M_r es la magnitud absoluta y $EW_{H\alpha}$ es el *equivalent width* o anchura equivalente de la línea $H\alpha$. Una vez calculada esta luminosidad corregida, se estima la SFR, en M_{\odot}/yr , por medio de la ecuación también propuesta por Hopkins et al. (2003):

$$SFR = \frac{L_{H\alpha,int}}{1.27 \cdot 10^{34}}. \quad (3.6)$$

En este caso, hemos asumido una función inicial de masas (IMF) de tipo Salpeter (1955). De haber utilizado otra IMF, el factor para calcular la SFR sería diferente.

Aplicando este procedimiento a las galaxias filtradas utilizando el diagrama BPT-NII (Figura 3), obtenemos los siguientes resultados reflejados en la Figura 4:

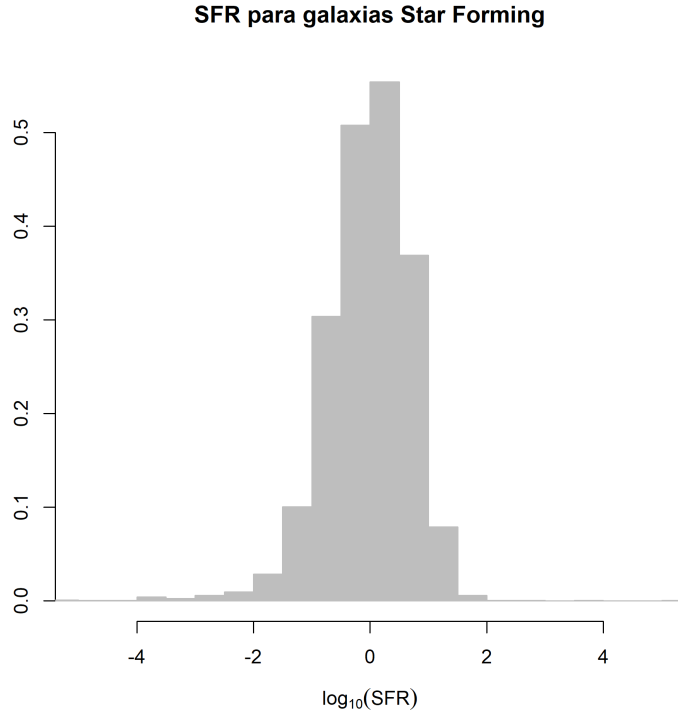


Figura 4: SFR para galaxias *Star Forming*

Es importante destacar que la relación utilizada para el cálculo de la SFR en esta sección no se puede utilizar para todas las galaxias. En el caso de tener AGNs u otro tipo de fenómenos, las expresiones (3.5) y (3.6) no serían válidas. No obstante, para estas situaciones la SFR se puede estimar, por ejemplo, utilizando un procedimiento similar al seguido por Kim et al. (2022), donde se calcula utilizando datos en el IR. Por otra parte, las galaxias con una SFR por encima de $10^2 M_{\odot}/\text{yr}$ se denominan galaxias '*Starburst*', y presentan valores anormalmente altos para la tasa de formación estelar, pudiendo ser estudiadas aparte.

También es importante tener en cuenta que al calcular la SFR aparecen muchos valores no numéricos o iguales a 0, ya sea porque carecíamos de algún dato o este no tenía sentido físico. Por tanto, hay que realizar otro filtro que nos descarte estas galaxias. Finalmente, el número de galaxias cae a 7162.

La razón principal por la que hemos utilizado este trazador es debido a que la radiación ionizante que provoca la presencia de esta línea la producen principalmente estrellas muy jóvenes. Si bien es cierto que es muy fácil de medir y es un método bastante directo para estimar la SFR, es necesaria la corrección de la extinción causada por el polvo u otros elementos y la asunción de una función inicial de masas. Atendiendo a las expresiones utilizadas, la corrección por extinción se realiza por medio del estudio del decremento Balmer, dado por el cociente $F_{H\alpha}/F_{H\beta}$ que aparece en la expresión (3.5). Por otra parte, la función inicial de masas utilizada, que como hemos dicho antes es de tipo Salpeter, se ve reflejada en el denominador de la expresión (3.6).

Una vez estimada la SFR, podemos ver cómo varía según el entorno donde se encuentren las galaxias y estudiar si se cumplen las relaciones conocidas.

4. Resultados

4.1. Relación Masa-SFR

En primer lugar, calculamos la relación Masa-SFR para las galaxias filtradas con el diagrama BPT. Sobre este resultado, realizamos un ajuste lineal donde fijamos la pendiente. Por último, filtramos los valores obtenidos con nuestros catálogos de filamentos, *voids* y *tendrils* dados.

Una vez diferenciadas las galaxias para cada estructura, realizamos un ajuste a la ordenada en el origen con la pendiente fija calculada anteriormente para el caso general, con el fin de estudiar la diferencia entre las SFRs de cada estructura.

Para calcular la ordenada en el origen óptima con una pendiente ya fija, basta con realizar el siguiente cálculo:

$$n = \bar{y} - m \cdot \bar{x} \quad (4.1)$$

Donde n es la ordenada en el origen, 'x' el logaritmo de la masa e 'y' el logaritmo de la SFR. Después de todos los filtros, nos queda información sobre las siguientes galaxias:

Filamentos	<i>Tendrils</i>	<i>Voids</i>
972	591	97

Cuadro 3: Número de galaxias en cada estructura

Que, a priori, parecen números muy bajos, pero es entendible dado que se han aplicado multitud de filtros.

Una vez hechos los ajustes, nos quedan los siguientes resultados, reflejados en la Figura 5:

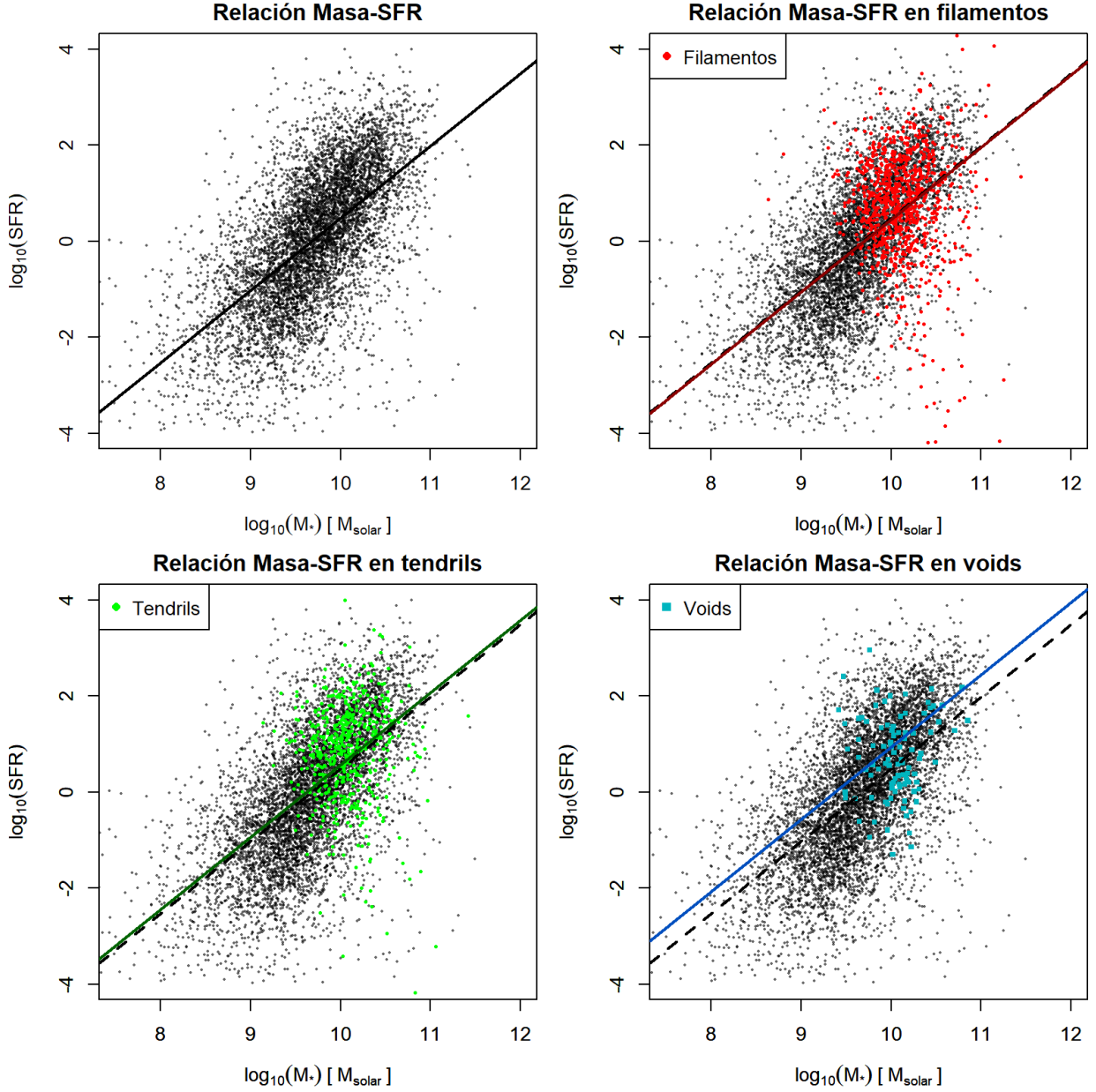


Figura 5: (a) Relación Masa-SFR de las galaxias *Star Forming*. (b) Relación Masa-SFR en filamentos. (c) Relación Masa-SFR en *tendrils*. (d) Relación Masa-SFR en *voids*.

En primer lugar, obtenemos un valor para la pendiente en el caso general que engloba todas las galaxias de $m = 1.508 \pm 0.023$, y un valor para la ordenada en el origen de $n = -14.59 \pm 0.23$.

Así pues, para el ajuste a la ordenada en el origen, obtenemos los siguientes valores:

$$n_{fil} = -14.62 \pm 0.11$$

$$n_{ten} = -14.51 \pm 0.15$$

$$n_{void} = -14.14 \pm 0.30$$

Para estudiar cómo está variando la SFR en cada estructura, realizamos ahora la diferencia entre el valor de la ordenada en el origen de la muestra general y la de la estructura que queremos estudiar, es decir:

$$\Delta n = n_{gen} - n_i \quad (4.2)$$

Quedando como resultado:

	n_{gen}	n_i	Δn
Filamentos	-14.59	-14.62	0.03
<i>Tendrils</i>	-14.59	-14.51	-0.08
<i>Voids</i>	-14.59	-14.14	-0.45

Cuadro 4: Diferencias en la SFR

Observamos que tenemos un valor positivo, aunque muy pequeño, para filamentos, mientras que para *tendrils* y *voids* obtenemos valores negativos. El significado de esto es que la SFR para la muestra de filamentos es muy similar a la muestra general, pero se sitúa un poco por debajo de esta, dando a entender que hay menos formación estelar en estas estructuras. Con los *tendrils* ocurre algo similar, en este caso, el valor obtenido es negativo aunque muy cercano a la muestra general, por lo que tenemos una SFR algo más activa. Por último, destaca la diferencia para el caso de los *voids*, aquí podemos observar que la diferencia es significativamente mayor que para las otras estructuras. Por tanto, y a la vista de este resultado, observamos que las regiones vacías y menos densas en cuanto a galaxias del universo parecen presentar episodios de formación estelar más activa que en el resto de regiones.

4.2. Morfología

Ahora, haremos un análisis de la morfología de las galaxias para cada estructura utilizando el índice de Sérsic (1963).

El perfil de Sérsic es una función que describe cómo la luminosidad de una galaxia varía con el radio, y sigue la siguiente relación:

$$I(r) = I_{ef} \exp\{-b_n[(r/r_{ef})^{1/n} - 1]\} \quad (4.3)$$

Donde,

$$b_n = 2n - \frac{1}{3} + \frac{4}{405n} \quad (4.4)$$

Y r_{ef} es el radio efectivo de la galaxia, que se define como aquel que contiene la mitad del flujo total de la misma. En realidad, el perfil de Sérsic es una generalización de la ley de Vaucouleurs, y si fijamos $n = 4$, recuperamos esta última, que nos sirve para describir cómo varía el brillo de las galaxias elípticas.

Esta relación se ajusta a galaxias luminosas para mayores n mientras que, para galaxias poco luminosas, el índice de Sérsic se vuelve más pequeño. Recordando la clasificación morfológica de Hubble, distinguíamos principalmente entre galaxias elípticas (E0-7) y espirales (Sa-c). Las galaxias elípticas son más luminosas al estar dominadas por movimientos aleatorios de las estrellas que albergan. Por otra parte, las galaxias espirales están dominadas por movimientos de rotación, por lo que tienen una luminosidad mucho menor. Así pues, encontramos que para las galaxias de tipo elíptico generalmente obtenemos valores de n más altos que para espirales. Si bien es cierto que algunas galaxias enanas no cumplen bien esta relación y no es del todo precisa, es útil para conocer qué tipos de galaxias pueblan cada una de las estructuras del universo. Típicamente, a partir de un índice de Sérsic mayor a 2.5, se considera que la galaxia es de tipo tardío.

Para realizar este análisis, definimos el catálogo 'SersicCatAllv07', que contiene información sobre los ajustes al modelo de Sérsic para todos los objetos galácticos en las bandas ugrizYJHK en el catálogo 'TilingCatv11'.

Tomando como muestra todas nuestras galaxias (histograma gris de la Figura 6) y aquellas que son 'Star Forming' (histograma azul de la Figura 6), comparamos los índices de Sérsic para la población entera, filamentos, *tendrils* y *voids* (histogramas (b), (c) y (d) de la Figura 6), obteniendo los siguientes resultados:

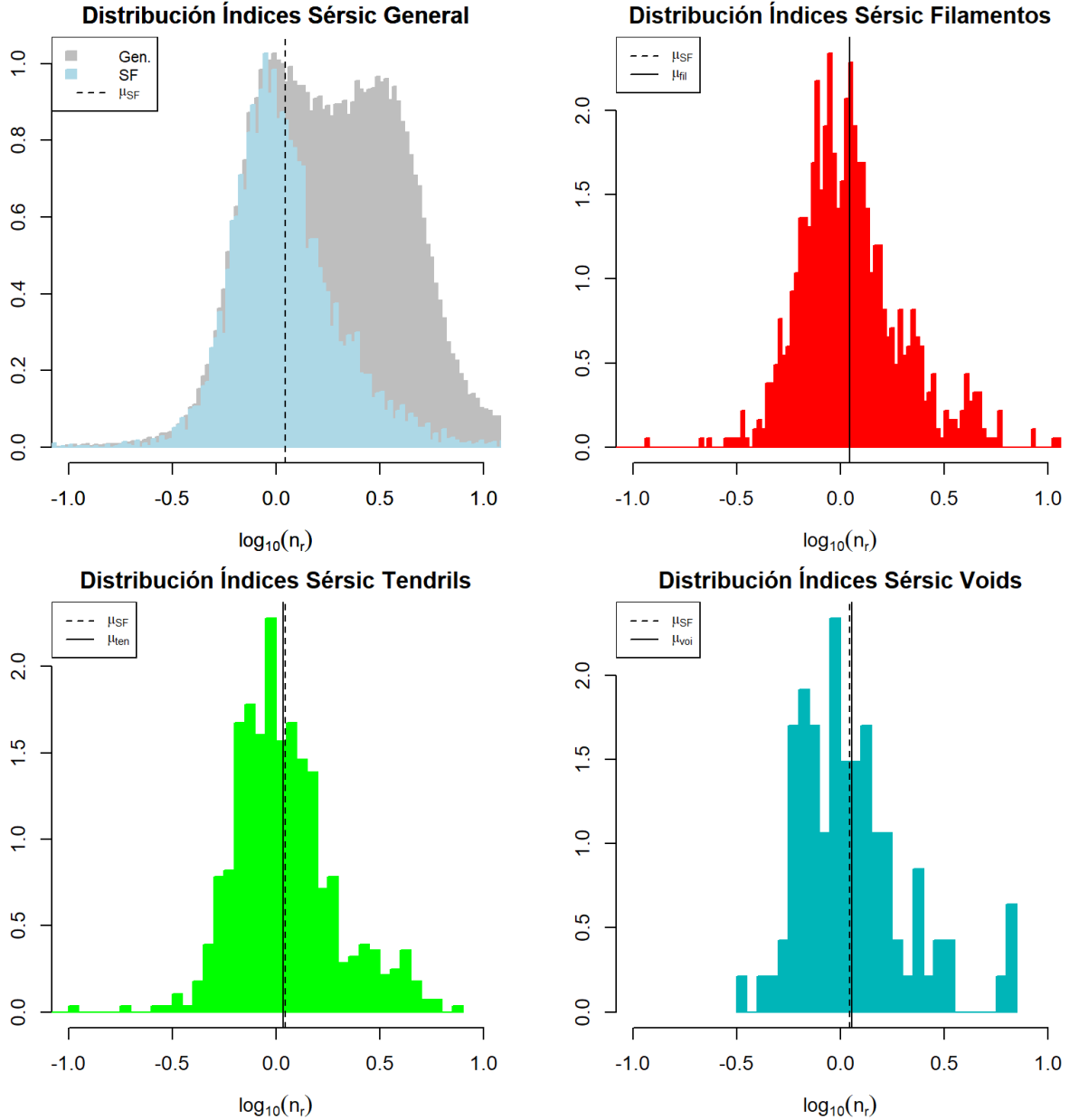


Figura 6: (a) Índices de Sérsic de las galaxias de la muestra general y *Star Forming*. (b) Índices de Sérsic en filamentos. (c) Índices de Sérsic en *tendrils*. (d) Índices de Sérsic en *voids*.

En estas gráficas, la línea discontinua indica la media del logaritmo del índice de Sérsic para la muestra general, y las líneas lisas, la media para la distribución de cada caso según sean filamentos, *tendrils* o *voids*.

Como podemos observar, vemos que la mayoría de galaxias se encuentran en valores para el índice de Sérsic de $n = 1$, es decir, tenemos un gran número de galaxias espirales e irregulares. Esto se debe principalmente a dos motivos. El primero es que en el universo hay un mayor número de galaxias enanas y poco luminosas, como ya estudió Schechter (1976), dejando como resultado la conocida función de luminosidad.

Por otro lado, las galaxias con formación estelar necesitan de nubes de polvo, que absorben gran cantidad de radiación de la propia galaxia y gas frío que se encuentra típicamente en galaxias poco luminosas, cuya radiación no puede escapar. Como podemos observar en la Figura 6, las medias de las distribuciones para filamentos, *tendrils* y *voids* tienen un índice de Sérsic de $n < 1$, es decir, son muy irregulares y hay un gran número de galaxias de tipo tardío.

Comparando con la muestra general, podemos observar que los índices de Sérsic para el caso de los filamentos son muy similares entre sí. Por otra parte, para *tendrils* y *voids*, si bien es cierto que no hay mucha diferencia con respecto al caso general, podemos hacer alguna observación. Encontramos que las galaxias en *tendrils* tienden a tener un índice menor que la muestra general, mientras que para los *voids* ocurre al revés, siendo de un tipo algo más temprano que el resto.

5. Discusión

Una vez finalizado el análisis, podemos ahora reflexionar sobre cómo influye el entorno en la evolución de las galaxias con respecto a su formación estelar.

A la vista de los resultados, podemos apreciar que la SFR, entre otras propiedades, varía dependiendo de la estructura donde se encuentre cada galaxia. Esto es una señal clara de que la formación estelar no es un fenómeno inherente a cada una, sino que está condicionada por el medio donde se encuentran, lo cual concuerda con las conclusiones de Sotillo-Ramos et al. (2021).

Uno de los principales resultados de este trabajo es que hemos observado como las galaxias que se encuentran en *voids*, que son regiones de muy baja densidad, presentan una mayor SFR que aquellas galaxias ubicadas en estructuras más densas como filamentos o *tendrils*. Este resultado coincide con lo que se concluyó, como ya hemos dicho antes, en el artículo de Sotillo-Ramos et al. (2021), donde se encontró precisamente que en entornos de menor densidad se observaba un aumento en la tasa de formación estelar. En estos entornos, hay un menor número de interacciones entre galaxias, ya que hay menos, y al producirse menos fenómenos violentos de fusiones o acreciones de galaxias, el gas interestelar se mantiene frío, lo cual es imprescindible para el colapso de las nubes moleculares y la formación de nuevas estrellas.

Por otra parte, en los filamentos y los *tendrils*, donde las interacciones entre galaxias son más frecuentes, lo que se observa es una menor SFR. Aunque estas interacciones pueden favorecer procesos de formación estelar en primera instancia, posteriormente pueden reactivar AGNs. El *feedback* de estos AGNs puede calentar o expulsar el gas de las galaxias, apagando la formación estelar en lo que se conoce como el fenómeno del *quenching*. Que ya fue documentado en los trabajos de Piotrowska et al. (2021) y vimos que concuerda con lo obtenido. No obstante, para filamentos, las diferencias en los resultados obtenidos como apreciamos en las Figuras 5 y 6 son muy pequeñas, por lo que no podremos afirmar diferencias significativas.

En el caso de los *tendrils*, los resultados indican una SFR por encima de la de los filamentos, aunque no superior a la de los *voids*. Esto es compatible con la hipótesis de que el entorno donde se encuentran las galaxias inhibe o favorece la formación estelar, ya que estas estructuras están en un escalón intermedio entre filamentos y *voids* y presentan una SFR intermedia entre ambas.

Como complemento al análisis de la formación estelar, también hemos realizado un estudio de la morfología, permitiendo conocer mejor las características de las galaxias que se encuentran en cada estructura. Observamos que, para todas ellas, la mayoría de las galaxias son de tipo tardío, lo

cual es indicativo de que las galaxias son espirales o irregulares. Esto confirma la hipótesis de que los fenómenos de formación estelar se dan de manera más recurrente para los tipos más tardíos de la secuencia de Hubble.

Cabe destacar que para *tendrils* se observa ahora un mayor grado de irregularidad. Sin embargo, esto puede ser debido a las interacciones entre las propias galaxias, ya que al estar en un entorno de densidad intermedia, aún pueden producirse interacciones entre las mismas. Si bien es cierto que tampoco podemos afirmar grandes diferencias, pues en la Figura 6 los valores obtenidos son muy similares entre sí.

En suma, podemos concluir que los resultados obtenidos refuerzan la idea de que el entorno juega un papel importante a la hora de determinar la evolución de las galaxias. Si bien es cierto que la masa es un factor clave en la SFR, ya que hemos visto que a mayor masa, mayor SFR. Sin embargo, está claro que el ambiente en que se sitúan las galaxias también es un elemento esencial para la formación de nuevas estrellas.

6. Conclusión

Este trabajo de investigación ha tenido como objetivo el estudio de la formación estelar de las galaxias según la estructura donde se encuentren, haciendo uso para ello del cartografiado GAMA. A través de un análisis detallado, hemos construido un diagrama BPT para obtener una muestra de galaxias *Star Forming*, sobre la cual hemos estimado una SFR utilizando como trazador la línea $H\alpha$.

Así pues, podemos realizar las siguientes conclusiones, de acuerdo con los resultados obtenidos y la discusión realizada en la sección anterior:

- La SFR es mayor para entornos de baja densidad de galaxias cuyo gas se mantiene más frío y dinámicamente tranquilo, favoreciendo la creación de nuevas estrellas.
- En regiones de mayor densidad, la SFR se ve inhibida por fenómenos de *feedback*, fruto de las interacciones con otras galaxias que ya de por sí calientan el gas disponible, o bien favorecen la reactivación de AGNs que pueden expulsar el material y aumentar la temperatura de las nubes moleculares.
- La relación M-SFR sigue las tendencias encontradas en la literatura, siendo la masa un factor determinante para la tasa de formación estelar.
- El estudio de la morfología indica que la mayoría de galaxias con formación estelar activa son de tipos tardíos según la línea evolutiva de Hubble, es decir, presentan un índice de Sérsic muy pequeño.

Así pues, podemos concluir que los resultados obtenidos son satisfactorios y reproducen las teorías encontradas.

6.1. Líneas futuras de investigación

Para complementar este estudio o mejorarlo en un futuro, se podrían añadir los siguientes elementos:

- Complementar la investigación con otros catálogos o cartografiados que permitan aumentar los tamaños de muestra.

- Incluir trazadores adicionales de SFR que no se vean tan afectados de extinción, como el infrarrojo medio o lejano, para una estimación mejor de la cantidad de gas y polvo de las galaxias.
- Relacionar los resultados obtenidos con las simulaciones cosmológicas disponibles para estudiar como variarán las diferentes estructuras del universo con el paso del tiempo.
- Estudiar la metalicidad y la composición química en función de la estructura y analizar su posible relación con los procesos de formación estelar.

Finalmente, la realización de este estudio permite una mayor comprensión de los fenómenos de formación estelar, así como de las principales estructuras del cosmos, y da paso a posibles nuevas investigaciones que nos ayuden a entender cómo y bajo qué principios funciona nuestro Universo. Pues aún queda mucho por descubrir.

Referencias

- Alpaslan, Mehmet et al. (mayo de 2014). “Galaxy and Mass Assembly (GAMA): fine filaments of galaxies detected within voids”. En: *Mon. Not. R. Aston. Soc. Lett.* 440.1, págs. L106-L110.
- Baldry, I et al. (jul. de 2007). “GAMA: a new galaxy survey”. en. En: *Proc. Int. Astron. Union* 3.S245, págs. 83-84.
- Baldwin, J. A., M. M. Phillips y R. Terlevich (feb. de 1981). “CLASSIFICATION PARAMETERS FOR THE EMISSION-LINE SPECTRA OF EXTRAGALACTIC OBJECTS.” En: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 93.551, pág. 5. DOI: 10.1086/130766. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/130766>.
- Driver, S. P. et al. (2011). “Galaxy and Mass Assembly (GAMA): survey diagnostics and core data release”. En.
- Driver, Simon P. (2008). “Galaxy And Mass Assembly (GAMA)”. En: *Proceedings of the International Astronomical Union* 4.S254, págs. 469-474. DOI: 10.1017/S1743921308027981.
- Feldbrugge, Job y Rien van de Weygaert (abr. de 2025). “What makes a cosmic filament? The dynamical origin and identity of filaments – I. Fundamentals in 2D”. en. En: *Mon. Not. R. Aston. Soc.* 539.2, págs. 873-901.
- Garduño, L. E. et al. (feb. de 2021). “Galaxy And Mass Assembly (GAMA): the interplay between galaxy mass, SFR, and heavy element abundance in paired galaxy sets”. En: 501.2, págs. 2969-2982. DOI: 10.1093/mnras/staa3799. arXiv: 2012.02922 [astro-ph.GA].
- Hopkins, A. M. et al. (dic. de 2003). “Star Formation Rate Indicators in the Sloan Digital Sky Survey”. En: *The Astrophysical Journal* 599.2, págs. 971-991. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.1086/379608. URL: <http://dx.doi.org/10.1086/379608>.
- Hubble, E. P. (dic. de 1926). “Extragalactic nebulae.” En: 64, págs. 321-369. DOI: 10.1086/143018.
- Kauffmann, Guinevere et al. (dic. de 2003). “The host galaxies of active galactic nuclei”. En: 346.4, págs. 1055-1077. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x. arXiv: astro-ph/0304239 [astro-ph].
- Kewley, L. J. et al. (jul. de 2001). “Theoretical Modeling of Starburst Galaxies”. En: 556.1, págs. 121-140. DOI: 10.1086/321545. arXiv: astro-ph/0106324 [astro-ph].
- Kim, Changseok et al. (mar. de 2022). “Determining Star Formation Rates of Active Galactic Nucleus Host Galaxies Based on SED Fitting with Submillimeter Data”. En: *The Astrophysical Journal* 928.1, pág. 73. ISSN: 1538-4357. DOI: 10.3847/1538-4357/ac5407. URL: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac5407>.
- Lara-López, M. A. et al. (sep. de 2013). “Galaxy And Mass Assembly (GAMA): a deeper view of the mass, metallicity and SFR relationships”. En: 434.1, págs. 451-470. DOI: 10.1093/mnras/stt1031. arXiv: 1306.1583 [astro-ph.CO].
- Piotrowska, Joanna M et al. (dic. de 2021). “On the quenching of star formation in observed and simulated central galaxies: evidence for the role of integrated AGN feedback”. En: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 512.1, págs. 1052-1090. ISSN: 1365-2966. DOI: 10.1093/mnras/stab3673. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stab3673>.
- Rodrigues, M et al. (jun. de 2016). “Galaxy And Mass Assembly (GAMA): Improved emission lines measurements in four representative samples at $0.07 \leq z \leq 0.3$ ”. En: *Astron. Astrophys.* 590, A18.
- Schechter, P. (ene. de 1976). “An analytic expression for the luminosity function for galaxies.” En: 203, págs. 297-306. DOI: 10.1086/154079.
- Sérsic, J. L. (feb. de 1963). “Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy”. En: *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina* 6, págs. 41-43.

- Sotillo-Ramos, D. et al. (dic. de 2021). “Galaxy and mass assembly (GAMA): The environmental impact on SFR and metallicity in galaxy groups”. En: 508.2, págs. 1817-1830. DOI: 10.1093/mnras/stab2641. arXiv: 2109.12078 [astro-ph.GA].
- Zarattini, Stefano y J. Alfonso L. Aguerri (2025). *Galaxy Transformation Across the Cosmic Web: Evolution of Stellar Colours and Star Formation Rates in Filaments*. arXiv: 2504.02026 [astro-ph.GA]. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.02026>.