

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Isabela Pompolino Salmaso

Populações de galáxias em filamentos cósmicos

São Paulo
Novembro 2025

Isabela Pompolino Salmaso

Populações de galáxias em filamentos cósmicos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador(a): Prof. Dr. Gastão B. Lima
Neto

São Paulo

Novembro 2025

À Gabriela, à Cristiane e ao Sérgio

Agradecimentos

Aos meus pais, Cristiane e Sérgio, por sempre acreditarem em mim, desde os meus primeiros dias de vida. Muito obrigada por todo o apoio para seguir meus sonhos e pelo esforço diário para me proporcionar sempre o melhor, ainda que dizer “obrigada” não seja suficiente para mostrar a minha gratidão diante de tudo o que vocês já fizeram por mim e continuam fazendo.

À minha irmã, Gabriela, por ser minha melhor amiga e a melhor pessoa que eu conheço. Diante de infinitas possibilidades, eu tive muita sorte de nascer sua irmã. Desde pequenas brincando de escolinha, você sempre foi a minha professora favorita e maior inspiração. Eu acredito que, se almas gêmeas realmente existirem, você é a minha.

Ao Andreas, por toda companhia durante a minha graduação. Sua parceria foi fundamental para tornar esse processo mais leve. Obrigada por celebrar comigo minhas conquistas desde o momento que eu passei na USP até a minha formatura. A forma como você se dedica aos seus próprios sonhos transborda em mim.

Aos meus amigos, por todos os estudos juntos na mesinha da Astro, jogos de baralho, campeonatos de sinuca e Dundies. Vocês fizeram esses anos serem inesquecíveis. Se eu tivesse que viver tudo de novo ao lado de vocês, eu faria.

Ao meu orientador, Gastão, por todo aprendizado, disposição e paciência ao longo de todos esses anos.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, por ser meu lar durante 4 anos e me proporcionar experiências que levarei por toda a vida.

À FAPESP, pela oportunidade e apoio financeiro, sob o projeto nº: 2024/11067-3.

“Tudo no mundo começou com um sim. Uma molécula disse sim a outra molécula e nasceu a vida. Mas antes da pré-história havia a pré-história da pré-história e havia o nunca e havia o sim. Sempre houve. Não sei o quê, mas sei que o universo jamais began.”

Clarice Lispector

Resumo

Em larga escala, a distribuição de matéria no universo se organiza em uma teia cósmica, dividida em três ambientes de densidade: aglomerados, filamentos e vazios. Por conta dos diferentes fatores ambientais de cada região, existem estudos para investigar se e como tais condições afetam as características das galáxias. Entretanto, há uma divergência quanto ao impacto nos filamentos cósmicos e, portanto, o foco do estudo foi investigar propriedades fotométricas das galáxias que residem em um ambiente de densidade intermediária.

Utilizando dados do *Data Release 18* do *Sloan Digital Sky Survey*, combinados aos catálogos *Galaxy Zoo 2* e *MPA-JHU*, foram selecionadas galáxias em um raio de 5,5 graus do Abell 1024, 2142 e 2067. Para identificar os aglomerados e filamentos nesses campos, foram aplicados, respectivamente, os métodos *Friends-of-Friends* e *Subspace Constrained Mean Shift*, sendo consideradas pertencentes aos filamentos as galáxias dentro de três distâncias perpendiculares aos eixos filamentares, 500 kpc, 1 Mpc e 2 Mpc. Foram desconsideradas as estruturas na região de efeito de borda de 20 minutos de arco. As galáxias também foram classificadas em populações galácticas, *Red Sequence*, *Green Valley* e *Blue Cloud*, e em tipos morfológicos, elípticas e espirais.

Os resultados obtidos mostram que as elípticas predominam na *Red Sequence*, com cores mais vermelhas, alta concentração e baixa formação estelar, enquanto as espirais dominam a *Blue Cloud*, sendo mais azuis, menos concentradas e com maior taxa de formação estelar. As galáxias do *Green Valley* apresentaram valores intermediários entre as populações galácticas. Analisando nos filamentos, tanto transversalmente quanto ao longo de seus eixos, não foram observadas tendências nas características das galáxias. Assim, os resultados indicam que, para os dados analisados, não foram identificados efeitos evidentes do ambiente filamentar sobre as propriedades estudadas.

Abstract

On a large scale, the distribution of matter in the universe is organized into a cosmic web, divided into three density environments: clusters, filaments, and voids. Due to the different environmental factors in each region, there are studies that investigate whether and how these conditions affect the characteristics of galaxies. However, there is a divergence regarding the impact on cosmic filaments, and therefore, the focus of this study was to investigate the photometric properties of galaxies residing in an intermediate-density environment.

Using data from the Data Release 18 of the Sloan Digital Sky Survey, combined with the Galaxy Zoo 2 and MPA-JHU catalogues, galaxies were selected within a 5.5 degree radius around Abell 1024, 2142, and 2067. To identify the clusters and filaments in these fields, the Friends-of-Friends and Subspace Constrained Mean Shift methods were applied, respectively. Galaxies were considered part of the filaments if they were located within three perpendicular distances from the filament axes, 500 kpc, 1 Mpc, and 2 Mpc, excluding structures within a 20-arcminute border region. Galaxies were also classified into galactic populations, Red Sequence, Green Valley, and Blue Cloud, and into morphological types, ellipticals and spirals.

The results show that ellipticals dominate the Red Sequence, with redder colours, higher concentration, and lower star formation rates, while spirals dominate the Blue Cloud, with bluer colours, lower concentration, and higher star formation rates. Green Valley galaxies presented intermediate values between these populations. In the filaments, both transversely and along their axes, no trends were observed in the galaxies' properties. Thus, the results indicate that, given the analysed data, no evident effects of the filamentary environment on the studied properties were detected.

Lista de Figuras

1.1	Teia cósmica	12
2.1	Efeito de borda	17
3.1	Aglomerados detectados pelo método FoF	22
3.2	Filamentos detectados pelo SCMS	23
3.3	Incerteza dos filamentos detectados	23
3.4	Galáxias dentro dos filamentos	23
4.1	Definição das populações galácticas	25
4.2	Morfologia ao longo dos filamentos	35
4.3	Índice de cor ao longo dos filamentos	35
4.4	Índice de concentração ao longo dos filamentos	36
4.5	Taxa de formação estelar ao longo dos filamentos	36

Lista de Tabelas

4.1	Amostras finais para as regiões em torno dos aglomerados Abell e a composição das populações galácticas.	26
4.2	Proporção morfológica das galáxias nos aglomerados.	29
4.3	Mediana do índice de cor $g - r$ das galáxias nos aglomerados.	30
4.4	Mediana do índice de concentração na banda g das galáxias nos aglomerados.	30
4.5	Mediana da taxa de formação estelar das galáxias nos aglomerados.	30
4.6	Proporção morfológica das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.	31
4.7	Mediana do índice de cor $g - r$ das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.	32
4.8	Mediana do índice de concentração na banda g das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.	33
4.9	Mediana da taxa de formação estelar das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.	34

Sumário

1. <i>Introdução</i>	11
1.1 Ambiente em larga escala	12
1.1.1 Densidade alta: aglomerados	13
1.1.2 Densidade baixa: vazios	13
1.1.3 Densidade intermediária: filamentos	14
2. <i>Base de dados</i>	15
3. <i>Métodos de detecção de estruturas cósmicas</i>	18
3.1 Metodologia	18
3.1.1 <i>Friends-of-Friends</i>	18
3.1.2 <i>Subspace Constrained Mean Shift</i>	19
3.2 Desenvolvimento e resultados	21
3.2.1 <i>Friends-of-Friends</i>	21
3.2.2 <i>Subspace Constrained Mean Shift</i>	22
4. <i>Análise fotométrica</i>	24
5. <i>Conclusões</i>	37
<i>Referências</i>	39

Capítulo 1

Introdução

No contexto do modelo cosmológico padrão Λ CDM, no qual o Universo é composto por 4% de matéria bariônica, 23% de matéria escura e 73% de energia escura, teoriza-se que as estruturas cósmicas se formam hierarquicamente a partir de perturbações no Universo primordial, ou seja, as pequenas estruturas são as primeiras a colapsar e as maiores se formam progressivamente.

Durante a Inflação, que ocorreu no início da formação do Universo, este passou por um processo de expansão exponencial, tornando-se uniforme em larga escala. Todavia, havia pequenas anisotropias quânticas e, devido às instabilidades gravitacionais, as amplitudes das flutuações aumentaram. Isso ocorreu porque regiões com sobredensidade atraem mais matéria e, por consequência, deixam essas áreas ainda mais densas.

Os filamentos consistem em estruturas que ainda estão evoluindo e funcionam como “rodovias cósmicas”, com grupos e aglomerados ao longo deles podendo ser identificados como superaglomerados. Eles transportam matéria e interligam regiões de alta densidade, os aglomerados, que são as maiores estruturas gravitacionalmente colapsadas (Bond et al., 1996). Estima-se que mais de 50% da matéria, gás e galáxias do Universo estejam agregadas nas estruturas filamentares, mesmo que elas ocupem apenas cerca de 6% do volume do Universo (Cautun et al., 2014).

Essas previsões são corroboradas por simulações cosmológicas de grande escala, como a Simulação do Milênio (Springel et al., 2005), que reproduz a formação da teia cósmica, composta por aglomerados, filamentos e vazios, como se pode visualizar na Figura 1.1, e a *The Three Hundred* (Santoni et al., 2024), a qual sugere que a conectividade de um aglomerado, isto é, o número de filamentos ligados a ele, correlaciona-se positivamente com sua massa, indicando que filamentos são fatores importantes na formação dos aglomerados.

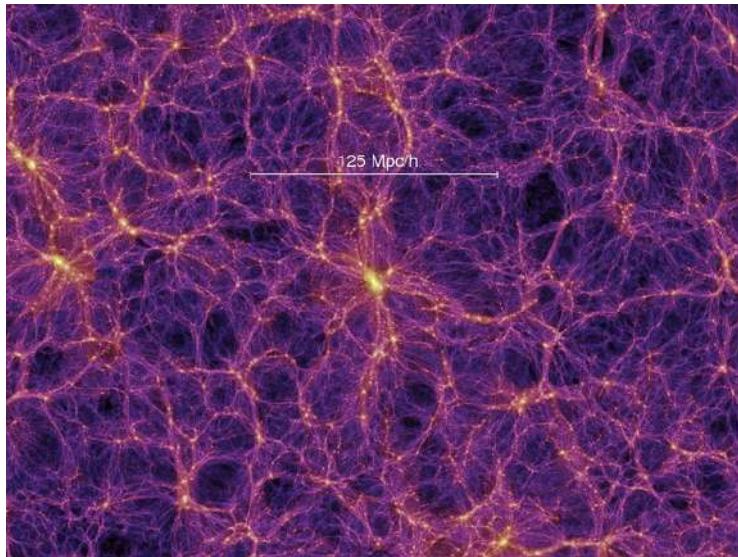


Figura 1.1: Universo em larga escala, dividido em aglomerados, filamentos e vazios. Figura retirada de Springel et al. (2005).

1.1 Ambiente em larga escala

As galáxias podem ser classificadas conforme seu tipo morfológico, sendo um tradicional esquema de classificação o diagrama de Hubble, no qual as galáxias são divididas em quatro classificações principais: elípticas, lenticulares, espirais e irregulares, cada uma com subclassificações, como a existência ou não de barra, elipticidade, entre outros.

Tipicamente, as elípticas apresentam uma população estelar mais antiga e, por conta disso, são mais avermelhadas do que as espirais, as quais geralmente possuem formação estelar ativa. As lenticulares são objetos intermediários, com características das elípticas e das espirais: um disco com estrelas mais velhas. Por fim, as irregulares não apresentam um formato bem definido e possuem uma alta taxa de formação estelar.

Além da morfologia, o índice de concentração (C), isto é, a razão entre os raios que contém 90% e 50% da luminosidade total da galáxia, é utilizado para separar sistemas disco ($C \lesssim 2,6$) daqueles dominados por bojo ($C \gtrsim 2,6$) (Strateva et al., 2001).

As galáxias são formadas e evoluem ao mesmo tempo que a teia cósmica se desenvolve e dependem dos fatores ambientais que a estão submetidas. Dentre eles, destaca-se a densidade do meio como um fator determinante na evolução galáctica, por exemplo, com mais galáxias elípticas e lenticulares presentes nos ambientes mais densos e as espirais nos menos densos (Dressler, 1980). Para entender melhor, pode-se dividir a teia cósmica em

três componentes de densidade: alta, intermediária e baixa (Bond et al., 1996).

1.1.1 Densidade alta: aglomerados

As regiões de alta densidade da teia cósmica são formadas por aglomerados, os quais são caracterizados por apresentar ambientes hostis para as galáxias. Estas podem passar por diferentes eventos capazes de modificar sua morfologia e propriedades físicas, como fusões de galáxias (Toomre e Toomre, 1972), canibalismo galáctico (Nipoti et al., 2004), pressão de arraste (Gunn e Gott, 1972), estrangulamento (Larson et al., 1980), assédio galáctico (Moore et al., 1996), entre outros. Dessa forma, o ambiente dos aglomerados é adequado para o estudo de processos de transformação morfológica e a relação entre galáxias, gás e matéria escura.

Os aglomerados contêm um meio intra-aglomerado composto por gás quente e difuso, que possui a maior parte da matéria bariônica dessas estruturas (Markevitch e Vikhlinin, 2007). Esse ambiente influencia diretamente a evolução das galáxias, suprimindo rapidamente a formação estelar e redistribuindo a matéria interestelar (Boselli e Gavazzi, 2006).

Além disso, os aglomerados são dominados por galáxias elípticas e lenticulares, de forma que pode-se usar a *Red Sequence* para localizá-los. Isso ocorre porque as elípticas possuem uma população estelar mais velha, o que as torna mais avermelhadas e luminosas. Com as galáxias vermelhas mais brilhantes, pode-se observá-las em um diagrama cor-magnitude, e, como elas são a maioria em aglomerados, a *Red Sequence* fica em evidência e, portanto, pode ser usada para localizá-los.

1.1.2 Densidade baixa: vazios

Os vazios, no cenário Λ CDM, correspondem a cerca de 77% do volume do Universo. As galáxias presentes nessa região são predominantemente espirais e estão majoritariamente isoladas, então elas passam por poucos processos de colisões e fusões, além de evoluir mais lentamente (van de Weygaert e Platen, 2011).

Observa-se também que, nesse ambiente, as galáxias tendem a ser mais azuis, menos massivas e mais compactas do que aquelas em regiões mais densas, sugerindo que a ausência de interações e a baixa densidade retardam a transformação morfológica e mantém a formação estelar ativa por mais tempo (Rojas et al., 2004). Sendo assim, as galáxias presentes nos vazios são propícias para o estudo da evolução secular.

1.1.3 Densidade intermediária: filamentos

Filamentos são componentes essenciais da teia cósmica, os quais moldam o campo gravitacional e de marés em escalas de Mpc e definem a conectividade entre as maiores estruturas do Universo (Bond et al., 1996). Essa é a região da teia cósmica em que há maior debate sobre quais os efeitos de um ambiente com densidade moderada nas propriedades das galáxias, uma vez que há divergências nos estudos.

Em Alpaslan et al. (2015), os autores identificaram que, mesmo controlando a massa estelar, galáxias em diferentes regiões da teia cósmica, incluindo os filamentos, apresentam propriedades similares, sugerindo que o ambiente em larga escala exerce uma fraca influência na cor, morfologia e população estelar das galáxias. Todavia, outros autores, como Porter et al. (2008), observaram que há um grande aumento na taxa de formação estelar em galáxias anãs em regiões a $2\text{-}3 h_{70}^{-1}$ Mpc do centro dos aglomerados, interpretado como resultado de interações entre galáxias ao longo dos filamentos. O termo h_{70}^{-1} Mpc indica uma distância ajustada pelo fator de Hubble adotado. E outros, como Darvish et al. (2015) e Martínez et al. (2016), identificaram que a taxa de formação estelar é menor em regiões filamentares, argumentando que esses ambientes podem induzir *quenching* antes mesmo das galáxias entrarem nos aglomerados.

Ademais, em Kuutma et al. (2017), foi observado que as propriedades das galáxias nos filamentos são intermediárias entre os vazios e os aglomerados, reforçando um caráter de zona de transição. Em Chen et al. (2017a), os autores observaram que, em regiões de mesma densidade local, há uma maior concentração de galáxias vermelhas e massivas próximas aos filamentos, enquanto as azuis e de menor massa predominam em regiões mais afastadas. Esse resultado é similar ao apresentado em Malavasi et al. (2017), para valores maiores de *redshift*.

Desse modo, evidencia-se que mais estudos são necessários para esclarecer se os filamentos cósmicos apresentam ou não um papel fundamental no processo evolutivo galáctico. Portanto, o objetivo deste estudo é analisar as galáxias em filamentos cósmicos, procurando correlações entre propriedades observáveis pelo imageamento de galáxias, como morfologia, taxa de formação estelar e índices de cor e de concentração, e a densidade do ambiente, buscando compreender a evolução das galáxias nos filamentos.

Capítulo 2

Base de dados

Para determinar quais galáxias fariam parte do estudo, foram selecionadas aquelas em um raio de busca de 5,5 graus dos aglomerados Abell 1024, 2142 e 2067, catalogados em Abell (1958). O Abell 1024, de classe de riqueza 1, apresenta outros 10 aglomerados relativamente próximos e, portanto, há uma grande possibilidade de existir filamentos passando por ele. O Abell 2142, de classe de riqueza 2, possui apenas outros quatro localizados em sua proximidade. Entretanto, ele é um dos aglomerados mais massivos conhecidos e está em processo avançado de fusão. Já o Abell 2067, de classe de riqueza 0, consiste em um sistema pouco denso e massivo, mas faz parte do superaglomerado de Hércules, com 15 aglomerados relativamente próximos a ele. Logo, há uma alta probabilidade de ter filamentos nessa região.

Para obter os dados das galáxias, foi utilizado o *Data Release 18* (DR18) do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Este consiste em um levantamento astronômico de observações fotométricas que cobre aproximadamente 1/3 do céu. Para coletar os dados, é utilizado um telescópio de 2,5 metros no Observatório de Apache Point, localizado no estado de Novo México dos Estados Unidos.

Para obter os dados, foi utilizado um código em SQL na plataforma do *Catalog Archive Server Jobs System* (CasJobs). Foram selecionadas galáxias com magnitudes menores que 23 em cinco bandas diferentes (u, g, r, i, z), incluindo as incertezas, além dos *redshifts* fotométricos e, quando disponíveis, espectroscópicos, com suas respectivas incertezas, e dos raios que contêm 50% e 90% da luminosidade total da galáxia nas cinco bandas. Com essas informações, foram obtidos os dados de cerca de 370 mil galáxias para o Abell 1024, 355 mil para o Abell 2142 e 399 mil para o Abell 2067.

O *redshift* fotométrico estima a velocidade de recessão de galáxias a partir do brilho me-

dido em diferentes filtros de banda larga, enquanto o *redshift* espectroscópico é obtido pela comparação entre as posições observadas das linhas espectrais e as previstas em repouso.

Após baixar os dados, como nem todas as galáxias estão na região de interesse do estudo, uma vez que muitas delas se encontram a distâncias radiais em relação à Terra que são bem superiores aos dos aglomerados, fez-se necessário aplicar uma seleção de galáxias, utilizando o *software Tool for Operations on Catalogues And Tables* (TOPCAT), para que permanecessem somente os dados desejados.

Primeiro foi realizada uma seleção usando a *Red Sequence*, como explicado na seção 1.1.1, para que fossem removidas galáxias longe dos aglomerados. Para isso, foram usados dois diagramas cor-magnitude, $g - r$ por r e $i - g$ por g , e então foram selecionadas somente galáxias próximas à região da *Red Sequence*.

Além disso, foi necessário limitar o intervalo de *redshift* fotométrico para focar somente nas estruturas na proximidade dos aglomerados, sendo escolhida uma faixa de $z_{fatica} = z_{aglomerado} \pm 0,06$, com $z_{A1024} = 0,073000$, $z_{A2142} = 0,089669$ e $z_{A2067} = 0,074538$. Após aplicar essas seleções, restaram aproximadamente 27 mil galáxias para o Abell 1024, 39 mil para o Abell 2142 e 34 mil para o Abell 2067.

Após selecionar quais galáxias fariam parte do estudo, foram obtidos os dados do *Galaxy Zoo 2* (GZ2). Este é um projeto em que voluntários classificam visualmente, a partir de imagens do SDSS, a morfologia de galáxias. Eles respondem um questionário hierárquico e cada objeto recebe múltiplas classificações, resultando em frações de voto, que podem ser interpretadas como probabilidades para cada tipo morfológico. Também são feitas correções de vieses sistemáticos, como de *redshift*, em que galáxias mais distantes tendem a ser classificadas como elípticas, mesmo quando são espirais (Willett et al., 2013). Assim, os dados do GZ2 foram utilizados para classificar morfologicamente as galáxias como elípticas ou espirais, usando as frações de votos corrigidas (*debiased fractions*) e adotando um limiar de 70% para definir a classificação final.

Além de definir a morfologia, foram obtidas a taxa de formação estelar (SFR, do inglês *star formation rate*) e a massa estelar (M_*) das galáxias a partir do catálogo MPA-JHU. Este, baseado em espectros do SDSS, calcula a SFR combinando diferentes indicadores: para galáxias com linhas de emissão fortes e confiáveis, a estimativa é feita a partir da luminosidade de $H\alpha$, corrigida por extinção, e, para aquelas com linhas de emissão fracas ou dominadas por núcleos ativos, as taxas são derivadas de ajustes de modelos espectrais e

propriedades fotométricas integradas. Já a massa estelar é estimada a partir de ajustes de populações estelares aplicados aos espectros do SDSS, com os modelos fornecendo razões massa-luminosidade para diferentes histórias de formação estelar, o que permite inferir a massa a partir do brilho observado (Brinchmann et al., 2004).

Por fim, destaca-se que, como as regiões escolhidas para estudo estão delimitadas por um círculo em torno dos aglomerados, é necessário considerar o chamado efeito de borda. Esse problema ocorre porque, próximo da região das bordas, as informações estão incompletas, isto é, há apenas galáxias na direção do interior da circunferência, não considerando aquelas que estão no exterior. Isso implica que, nessas regiões, a reconstrução dos filamentos e dos aglomerados pode ser comprometida, visto que a densidade local tende a ser subestimada. Logo, as estruturas identificadas nesse contorno não serão levadas em consideração. Na Figura 2.1 está destacada, em cinza escuro, uma região de borda de 20 minutos de arco (arcmin) nos campos dos aglomerados Abell 1024, 2142 e 2067.

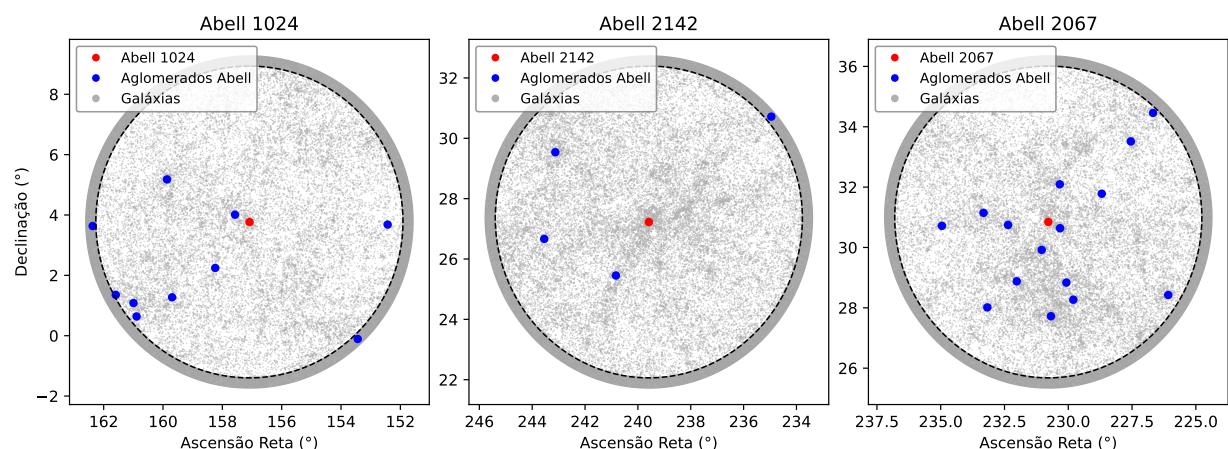


Figura 2.1: Região de borda destacada, em cinza escuro, para os campos dos aglomerados Abell 1024, 2142 e 2067.

Portanto, foram determinadas as galáxias a serem utilizadas nos métodos de detecção de estruturas cósmicas.

Capítulo 3

Métodos de detecção de estruturas cósmicas

Nesse estudo, foram utilizados dois diferentes métodos de detecção de estruturas cósmicas.

3.1 Metodologia

Nessa seção são descritos os fundamentos teóricos desses métodos.

3.1.1 *Friends-of-Friends*

O *Friends-of-Friends* (FoF) foi desenvolvido com o objetivo de classificar quais pontos pertencem a um mesmo conjunto, sendo usado em Huchra e Geller (1982) para identificar grupos de galáxias. Conforme o desenvolvimento desse método, em Einasto et al. (2014), o único critério de seleção para dois pontos fazerem parte de um mesmo grupo passou a ser a distância entre eles. Esse método passou a ser utilizado também na atualidade para definir halos de matéria escura em simulações de N-corpos (Davis et al., 1985).

O funcionamento do FoF consiste em posicionar uma esfera de raio R , chamado parâmetro de ligação, no centro de cada galáxia. Caso uma esteja a uma distância menor que R de outra, elas são consideradas “amigas”. Esta é uma relação transitiva, isto é, se a galáxia A está dentro do raio R da B e da C, estas duas também são consideradas “amigas”, seguindo a lógica de que “a amiga da minha amiga também é minha amiga”. Assim, pode-se detectar quais galáxias fazem parte de aglomerados e comparar suas propriedades com as que fazem parte dos filamentos cósmicos.

A vantagem de utilizar este método é que, enquanto outros utilizam esferas de sobre-densidade, o FoF não pressupõe geometria para os grupos, além de ser computacionalmente eficiente. Entretanto, o parâmetro de ligação apresenta uma sensibilidade significativa, de

forma que seu valor não pode ser nem pequeno demais para não fragmentar aglomerados em múltiplos pequenos grupos, nem grande demais para evitar que estruturas distintas sejam conectadas, caracterizando um problema de *overlinking*.

3.1.2 Subspace Constrained Mean Shift

O método *Subspace Constrained Mean Shift* (SCMS) consiste em uma abordagem estatística para detectar estruturas em uma distribuição de pontos, baseada na busca por máximos locais e selas em um campo de densidade (Ozertem e Erdogan, 2011). Em Chen et al. (2015), é descrito o algoritmo *Cosmic Web Reconstruction* (CWR), o qual utiliza o SCMS para identificar filamentos cósmicos em distribuições tridimensionais de galáxias. A base desse método está no formalismo de cristas de densidade de um campo de densidade $p(x)$, definido em d dimensões, as quais correspondem a regiões de densidade elevada e alongada, podendo ser interpretadas como filamentos (Chen et al., 2014). Essas cristas de densidade podem ser escritas como

$$Ridge(p) \equiv (x | G(x) = 0, \lambda_2(x) < 0), \quad (3.1)$$

com $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_d$ representando os autovalores da matriz hessiana de $p(x)$ e $(v_1, v_2, v_3, \dots, v_d)$ os autovetores correspondentes. Estes, associados aos menores autovalores, formam o subespaço $V(x)$, sobre o qual o gradiente do campo de densidade $\nabla p(x)$ é projetado. Essa operação é chamada de $G(x)$ e sua anulação, isto é, $G(x) = 0$, indica que, no subespaço ortogonal ao autovetor principal v_1 , o ponto x está em equilíbrio, enquanto a condição $\lambda_2(x) < 0$ assegura que há concavidade negativa transversal à direção principal, característica de uma crista.

Assim, identificar as cristas de $p(x)$ é fundamental, uma vez que encontrá-las é equivalente a localizar máximos de uma função unidimensional, para os quais a primeira derivada é zero e a segunda é negativa. Isso permite definir filamentos como curvas suaves que percorrem regiões de maior densidade dentro do conjunto de posições galácticas observadas.

Para implementar o algoritmo, inicialmente são fornecidas as posições das galáxias $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, sobre as quais é determinado o campo de densidade, utilizando o estimador de Kernel

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\|x - X_i\|}{h}\right), \quad (3.2)$$

sendo K um kernel gaussiano de suavização, d a dimensão do espaço e h a largura de banda. Esta é um parâmetro fundamental, visto que ela controla o grau de suavização e pode ser definida como

$$h = A_0 \times \left(\frac{1}{d+2}\right)^{\frac{1}{d+4}} n^{-\frac{1}{d+4}} \sigma_{min}, \quad (3.3)$$

com σ_{min} representando o menor desvio padrão calculado entre as componentes de cada coordenada e A_0 um parâmetro livre, o qual define o nível de suavização de acordo com a escala determinada pela amostra de galáxias. Além disso, aplica-se um nível de corte τ , o qual está associado à variabilidade do campo de densidade e pode ser descrito como

$$\tau = \sigma(\hat{p}) = \left(\int_{\mathcal{K}} (\hat{p}(x) - \bar{p}(\mathcal{K}))^2 dx\right)^{1/2} \approx \hat{p} - \bar{p}, \quad (3.4)$$

que corresponde à raiz quadrada média das flutuações de densidade. Esse limiar é importante porque ele elimina regiões de densidade significativamente baixa, onde estruturas detectadas tenderiam a ser artificiais.

Após estimar o campo de densidade, o algoritmo calcula o hessiano e o gradiente em cada ponto amostral. Estes, então, são deslocados repetidamente na direção das cristas, até convergirem, sendo interrompido esse processo quando a mudança é inferior a 10^{-4} ou ocorrem 1000 iterações. O resultado de todo esse processo é um esqueleto que delinea os eixos filamentares presentes na região.

Entretanto, é necessário confirmar se os filamentos detectados são confiáveis ou são frutos de flutuações aleatórias, como descrito em Chen et al. (2015). Para calcular as incertezas, é realizado o processo de *smooth bootstrap*, em que são gerados $B = 100$ conjuntos reamostrados X_{sj}^i , contendo o mesmo número de galáxias iniciais, e que são estimados a partir da amostra original X_0 . Para cada novo conjunto é refeito o processo de SCMS e, então, obtém-se uma nova amostra de eixos filamentares. Para cada ponto \hat{x}_0 pertencente ao filamento original, calcula-se a distância D_j até o ponto mais próximo obtido em cada reamostragem.

Para confirmar se os pontos são estáveis, é usada uma função de mérito, também chamada de confiança C ,

$$C(\bar{x}_0) = \sqrt{\frac{1}{B} \sum_{j=1}^B D_j}, \quad (3.5)$$

de forma que valores pequenos de C indicam pontos estáveis, isto é, os filamentos detectados nas reamostragens estão próximos dos localizados originalmente. Já valores altos apontam pontos instáveis, cujas posições variam significativamente entre as reamostragens.

Para considerá-los instáveis, é avaliada a média \bar{C} e o desvio padrão σ_C da confiança de todos os pontos \hat{x}_0 ao longo dos filamentos originais, calculados a partir de

$$C(\hat{x}_0) \geq \bar{C} + 1,69\sigma_C. \quad (3.6)$$

Portanto, ao final do processo, são mantidos apenas filamentos robustos e estatisticamente significativos, reduzindo a contaminação gerada pelo ruído de amostragem.

3.2 Desenvolvimento e resultados

Nessa seção estão o processo de implementação em duas dimensões e os resultados obtidos em cada método.

3.2.1 Friends-of-Friends

Neste método, para determinar o parâmetro de ligação, percorreu-se um intervalo de valores e, para cada um, foi executado o FoF e calculada a fração de galáxias pertencentes ao maior componente conectado, isto é, ao maior conjunto de galáxias ligadas entre si.

Observando o comportamento desta fração em função do parâmetro de ligação, inicialmente há um crescimento lento, dominado por conexões internas aos aglomerados. Todavia, conforme o parâmetro aumenta, há um aumento acentuado, uma vez que as estruturas passam a ser ligadas entre si, caracterizando uma percolação. Assim, o valor adotado para o parâmetro de ligação corresponde ao “joelho” dessa curva, isto é, ao maior valor antes do início da percolação.

Para determiná-lo, são comparados dois modelos: uma reta única e uma regressão segmentada com um ponto de quebra, avaliada por meio do critério de informação bayesiano (BIC). Quando o modelo segmentado apresenta BIC menor, o “joelho” é definido pela posição da quebra, mas, caso contrário, adota-se o ponto de maior inclinação da curva.

Obteve-se um valor de 1.62, 1.86 e 2.1 arcmin para o parâmetro de ligação nos campos dos aglomerados Abell 1024, 2142 e 2067, respectivamente. Para selecionar apenas aglomerados ricos, foram consideradas estruturas válidas somente aquelas com pelo menos 15 galáxias. Os aglomerados detectados podem ser visualizados na Figura 3.1.

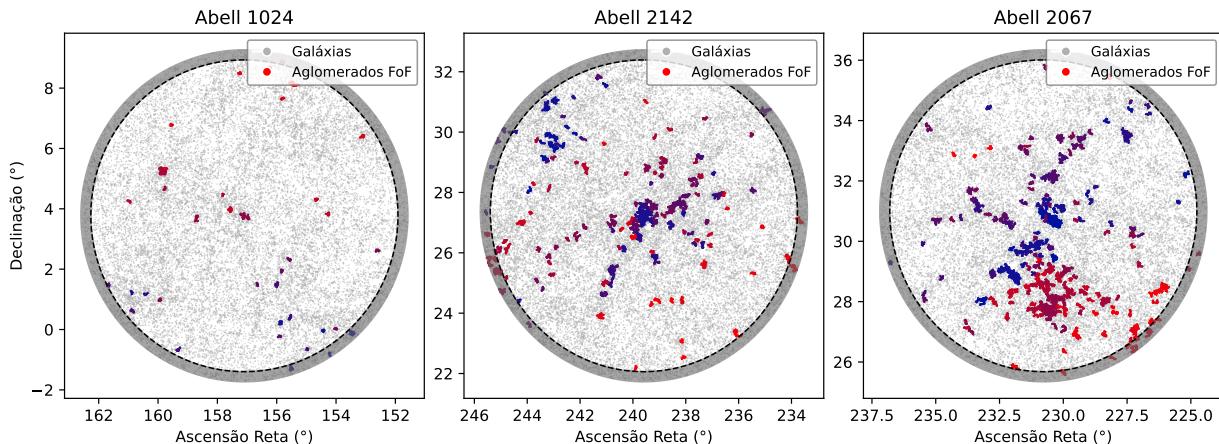


Figura 3.1: Método FoF aplicado nas galáxias selecionadas. Aqueles detectados na região de borda não foram considerados no estudo.

3.2.2 Subspace Constrained Mean Shift

Nesse método, foi utilizada uma versão atualizada do código CWR, em duas dimensões, adaptada pela Natália Crepaldi Del Coco, cujo código está disponível nesse *link* do *Github*.

Foram utilizados três valores para o parâmetro livre A_0 da Equação 3.3, 0.6, 0.7 e 0.8, e, portanto, foram feitas três diferentes detecções filamentares, como se pode visualizar na Figura 3.2. Quanto menor o valor de A_0 , mais filamentos são identificados, mas há uma maior quantidade de falsas detecções, então, para que permanecessem somente aqueles mais proeminentes, foi fixado o valor $A_0 = 0.8$.

Com os filamentos detectados, foi analisada a confiabilidade de cada ponto e removidos aqueles considerados instáveis. A incerteza dos filamentos confiáveis pode ser vista na Figura 3.3.

Para determinar quais galáxias estão dentro dos filamentos, foram escolhidas três distâncias perpendiculares aos eixos filamentares, 500 kpc, 1 Mpc e 2 Mpc. Sendo assim, considerando que o eixo do filamento consiste em um conjunto de pontos, caso uma galáxia esteja dentro de uma determinada distância de qualquer um deles, ela é considerada pertencente ao filamento. O resultado desse processo está na Figura 3.4.

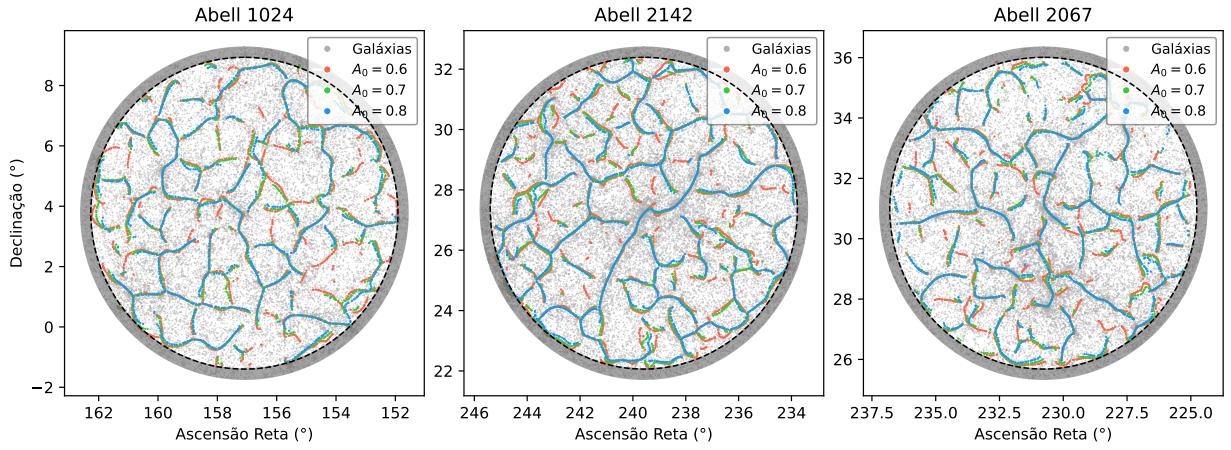


Figura 3.2: Filamentos detectados pelo método SCMS para três valores de parâmetro livre A_0 . Aqueles detectados na região de borda não foram considerados no estudo.

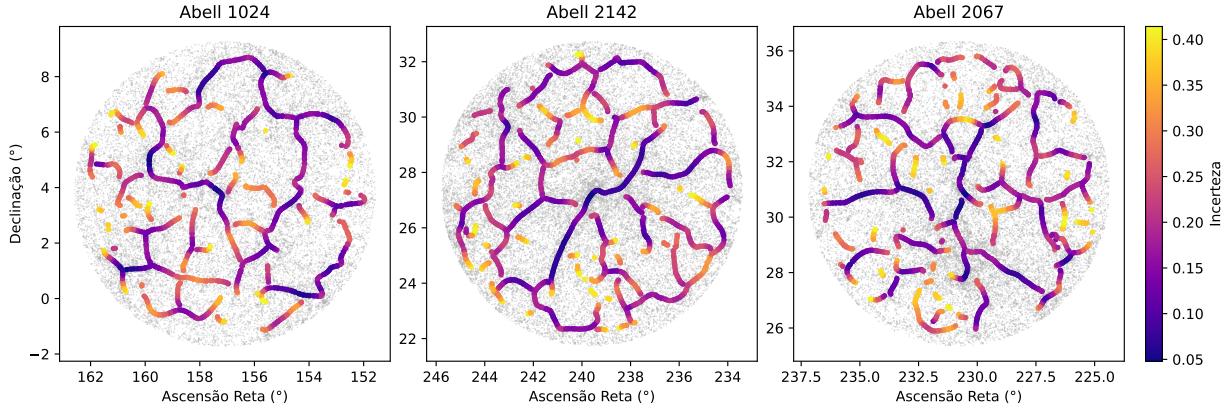


Figura 3.3: Incerteza dos filamentos detectados e que são confiáveis pelo SCMS.

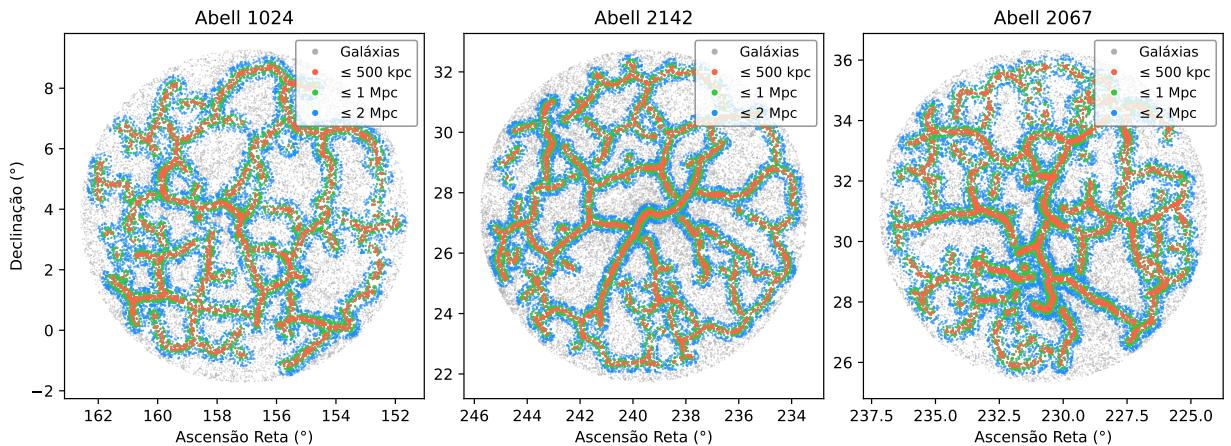


Figura 3.4: Galáxias dentro dos filamentos para três distâncias transversais aos eixos filamentares: 500 kpc, 1 Mpc e 2 Mpc.

Capítulo 4

Análise fotométrica

Considerando as galáxias pertencentes aos aglomerados e aos filamentos, aquelas que não estão associadas a nenhum desses ambientes foram definidas como pertencentes aos vazios.

Para analisar as propriedades fotométricas das galáxias na teia cósmica, primeiramente deve-se considerar as diferentes populações galácticas existentes. No diagrama $\log(\text{SFR})$ - $\log(M_*)$, observa-se que as galáxias estão agrupadas em faixas definidas, denominadas *Red Sequence*, *Green Valley* e *Blue Cloud*, as quais refletem, por exemplo, o estágio evolutivo de suas populações estelares (Eales et al., 2018).

A *Red Sequence* corresponde à região ocupada por galáxias passivas, nas quais o processo de formação estelar está praticamente cessado e cuja população estelar é antiga, fria e avermelhada. Tais galáxias apresentam alta concentração de luz, indicando que são sistemas dominados por bojos, que é uma característica típica de galáxias elípticas e lenticulares (Bremer et al., 2018). Elas são frequentemente encontradas em ambientes densos, como aglomerados, onde processos ambientais, como pressão de arraste, removem o gás interestelar e, consequentemente, aceleram o encerramento da formação estelar (Peng et al., 2010).

A *Blue Cloud* consiste na região ocupada por galáxias jovens e ricas em gás interestelar frio, as quais são dominadas por estrelas azuladas e massivas. As galáxias dessa região apresentam um intenso processo de formação estelar, o que caracteriza uma fase ativa (Eales et al., 2018). Essas galáxias estão presentes predominantemente em regiões de baixa densidade, como nos vazios, onde há menos interações gravitacionais e maior disponibilidade de gás frio, de forma que a formação estelar é sustentada por mais tempo (Peng et al., 2010).

Entre essas duas regiões, há o Green Valley, no qual a formação estelar das galáxias diminui gradualmente, marcando a transição entre a fase ativa e a passiva. Sendo assim, sua população estelar está progressivamente sendo dominada por estrelas mais antigas e evoluídas. Essa transição é interpretada como intermediária do processo de *quenching*, a qual pode ser impulsionada por fatores, como o esgotamento de gás disponível (Schawinski et al., 2014).

A separação entre as populações galácticas foi feita inspirada na metodologia descrita em Trussler et al. (2020). Considerando o diagrama $\log(\text{SFR})$ - $\log(M_*)$, é ajustada uma reta que representa a sequência principal de formação estelar. A partir dela, são traçadas duas outras retas paralelas, as quais delimitam as regiões ativas e passivas, cuja faixa intermediária entre elas, separada por aproximadamente 0.5 dex em $\log \text{SFR}$, define o *Green Valley*. Essas retas foram ajustadas nas distribuições das populações das amostras analisadas e foi mantido o mesmo critério de regiões: as galáxias acima da reta superior são consideradas pertencentes à *Blue Cloud*, as abaixo da inferior à *Red Sequence* e, as que estão entre elas, ao *Green Valley*. O resultado desse processo pode ser visto na Figura 4.1.

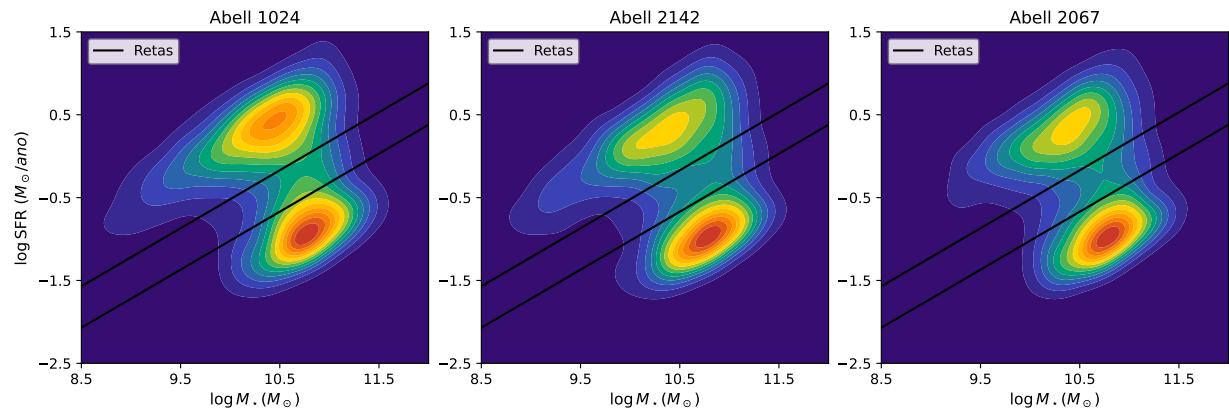


Figura 4.1: Definição das populações galácticas para os campos dos aglomerados Abell 1024, 2142 e 2067.

Além de definir as populações galácticas, as galáxias também foram classificadas conforme seu tipo morfológico, sendo categorizadas como elípticas ou espirais. Por conta dessas seleções, as amostras foram reduzidas de aproximadamente 27 mil para 1232 galáxias no Abell 1024, 39 mil para 1466 no Abell 2142 e 34 mil para 1465 no Abell 2067. A Tabela 4.1 contém as estatísticas para os campos dos aglomerados, incluindo a divisão entre espirais e elípticas e a distribuição em *Red Sequence*, *Green Valley* e *Blue Cloud*.

Tabela 4.1 - Amostras finais para as regiões em torno dos aglomerados Abell e a composição das populações galácticas.

Região ao redor do Abell	Morfologia	Número total de galáxias		
		<i>Red Sequence</i>	<i>Green Valley</i>	<i>Blue Cloud</i>
1024	Elíptica	336	53	103
	Espirais	128	84	528
2142	Elíptica	440	39	76
	Espirais	174	108	629
2067	Elíptica	435	53	83
	Espirais	165	100	629

Com as amostras definidas, foi possível verificar a recorrência de cada morfologia nos ambientes da teia cósmica. Em seguida, foram calculadas as medianas da taxa de formação estelar e dos índices de cor $g - r$ e de concentração na banda g . Para os filamentos, essa análise foi feita para as três distâncias perpendiculares aos eixos filamentares e também ao longo deles, isto é, em função da distância até o aglomerado mais próximo. Os resultados estão entre as Tabelas 4.2 e 4.9 e as Figuras 4.2 e 4.5.

Observando os resultados, nota-se que, para todos os campos e independentemente do ambiente cósmico, na *Red Sequence* há uma maior proporção de elípticas e, na *Blue Cloud*, de espirais. Já no caso do *Green Valley*, há mais elípticas nos aglomerados e espirais nos filamentos e vazios. Em Alpaslan et al. (2016), os autores destacam que diferenças morfológicas ao longo da teia cósmica podem ser fracas em análises de campos individuais, o que foi observado nos resultados.

Para o índice de cor $g - r$, observa-se que, em todos os campos, ambientes e populações galácticas, em geral as elípticas são mais avermelhadas do que as espirais, mas sem uma diferença significativa nos valores. Ambos tipos morfológicos são mais azulados na *Blue Cloud* do que na *Red Sequence* e no *Green Valley*, sendo que, neste, nos aglomerados de todos os campos e nos filamentos da região do Abell 2142, as elípticas são mais avermelhadas do que na *Red Sequence*. Em Eales et al. (2018), os autores notaram que, no *Green Valley*, as galáxias tendem a apresentar cores intermediárias entre populações ativas e passivas, cuja transição pode variar conforme ambiente cósmico, o que não foi observado completamente nos campos estudados.

Para o índice de concentração na banda g , em todos os campos, ambientes e populações galácticas, as elípticas são mais concentradas do que as espirais, com ambos tipos mor-

fológicos seguindo uma ordem no índice: valores menores na *Blue Cloud*, intermediários no *Green Valley* e maiores na *Red Sequence*. Nos aglomerados, a concentração das elípticas no *Green Valley* e na *Red Sequence* é similar, mas as espirais são mais concentradas nesta população galáctica. Esses comportamentos foram observados em Shimasaku et al. (2001), no qual os autores identificaram que galáxias elípticas são mais concentradas. Já em Schawinski et al. (2014), foi notado que as galáxias passam pela transição de serem dominadas por disco para bojo no *Green Valley*, com as espirais se tornando progressivamente mais concentradas até atingirem o ápice na *Red Sequence*.

Para a taxa de formação estelar, nota-se que, para ambos tipos morfológicos e em todos os ambientes e campos, na *Red Sequence* quase não há estrelas sendo formadas, enquanto que, na *Blue Cloud*, os valores obtidos são maiores, principalmente para as espirais, evidenciando que há maior formação estelar nesta morfologia. Observa-se também que os valores no *Green Valley* são intermediários entre aqueles exibidos na *Red Sequence* e na *Blue Cloud*, com as espirais apresentando, em geral, maior formação estelar. Esse comportamento foi observado em Alpaslan et al. (2016), cujos autores caracterizaram o *Green Valley* como um estágio de transição da SFR, com as espirais apresentando uma queda mais gradual da taxa de formação estelar do que as elípticas.

Ademais, pode-se analisar as propriedades fotométricas perpendicularmente aos filamentos, isto é, em relação à distância transversal dos eixos filamentares. Observando a recorrência da morfologia, nota-se que, independentemente da população galáctica, nos campos do Abell 2142 e 2067, não há uma tendência clara na proporção da morfologia em relação à distância dos eixos filamentares, enquanto que, na região do Abell 1024, no *Green Valley*, há um aumento de elípticas. Em Martínez et al. (2016) e em Alpaslan et al. (2016), os autores observaram que tendências ambientais podem ser mais fracas em amostras reduzidas, sendo mais evidentes em conjuntos mais amplos.

Para o índice de cor $g - r$, na *Blue Cloud* de todos os campos não há um padrão claro de mudança, assim como na *Red Sequence*, com exceção das espirais da região do Abell 2142, que aparecem mais azuladas ao se afastarem dos eixos filamentares. Já no *Green Valley* de todos os campos, nota-se que ambas morfologias apresentam cor mais azulada conforme maior a distância ao eixo filamentar, exceto para as elípticas da região do Abell 2067, as quais não exibem uma tendência evidente. Em Chen et al. (2017b) e em Martínez et al. (2016), foi identificado que gradientes transversais em cor podem ser

significativamente enfraquecidos quando analisados em campos individuais, especialmente em filamentos menos massivos ou menos conectados aos nós cósmicos.

Para o índice de concentração na banda g , observa-se, na *Red Sequence*, que não há um padrão para os campos do Abell 1024 e 2142, mas, para o do Abell 2067, ambas morfologias apresentam menor concentração. No *Green Valley*, nota-se que, para todos os campos, as elípticas não apresentam um comportamento evidente em relação à distância aos eixos filamentares, mas as espirais das regiões do Abell 1024 e 2067 aparentam mais concentradas e, as do Abell 2142, menos. Já na *Blue Cloud*, observa-se, nos campos do Abell 2142 e 2067, uma tendência das espirais apresentarem menor concentração. Em Martínez et al. (2016), foi observado que diferenças estruturais transversais aos filamentos são mais evidentes em ambientes massivos e conectados.

Para a taxa de formação estelar, observa-se que, na *Red Sequence*, nas regiões do Abell 1024 e 2142, o valor da SFR das espirais diminui conforme a distância aumenta, ocorrendo o contrário para o campo do Abell 2067. No *Green Valley*, para a região do Abell 1024, nota-se uma diminuição da taxa de formação estelar das espirais, enquanto que, para os campos do Abell 2142 e 2067, há um aumento, assim como uma redução na SFR das elípticas. Na *Blue Cloud*, para a região do Abell 1024, há um comportamento de diminuição da SFR para as espirais e aumento para as elípticas, mas, para a região do Abell 2142, há uma redução nesta morfologia conforme as galáxias se afastam dos eixos filamentares. Em Malavasi et al. (2022) e Martínez et al. (2016), os autores argumentam que gradientes de SFR perpendiculares aos filamentos são detectáveis principalmente em grandes amostras.

Por fim, também é possível analisar as propriedades fotométricas ao longo dos filamentos, isto é, no decorrer dos eixos filamentares. Na *Red Sequence*, observa-se que, para todos os campos, há uma predominância de elípticas, com apenas algumas alternâncias em determinadas distâncias ao aglomerado mais próximo. No *Green Valley*, fica evidente que não há uma tendência clara de morfologia dominante ao longo do filamento, exceto para a região do Abell 2142, com mais espirais. Na *Blue Cloud*, para todos os campos, observa-se uma predominância de espirais. Em Sarron et al. (2019) e Kuutma et al. (2017), os autores concluíram que a transformação morfológica associada aos filamentos tende a ocorrer de maneira localizada, principalmente nas regiões próximas aos nós e não ao longo de todo o seu comprimento.

Para os índices de cor $g - r$ e de concentração na banda g , para todas as populações

galácticas, morfologias e campos, fica evidente que não há padrões claros ao longo dos filamentos, entretanto, é possível observar que, na maioria dos casos, as elípticas aparecem mais concentradas do que as espirais, mas não apresentam diferenças na cor. Em Sarron et al. (2019) e Alpaslan et al. (2016), foi observado que variações contínuas ao longo dos filamentos não são comumente observadas, com maiores diferenças nas regiões de nós da teia cósmica.

Para a taxa de formação estelar, em todos os campos e morfologias, esta é praticamente nula na *Red Sequence*, e, portanto, quase não há estrelas sendo formadas. No *Green Valley*, os valores são maiores, indicando que a taxa de formação estelar das galáxias ainda não cessou e, na *Blue Cloud*, nota-se níveis consideráveis de SFR, mas não é possível observar, em nenhuma das populações galácticas, tendências de comportamentos claras ao longo do filamento. Em Alpaslan et al. (2016) e Tempel et al. (2014), os autores apontaram que mudanças significativas na SFR ao longo dos filamentos ocorrem principalmente próximos aos nós.

Destaca-se que a ausência de gradientes estatisticamente significativos no comportamento das galáxias não implica, necessariamente, a inexistência de padrões. A análise foi feita para três campos específicos, cada um com um número restrito de galáxias em cada ambiente cósmico, o que reduz a sensibilidade para detectar variações ao longo e transversalmente aos filamentos. Como há limitação no número de objetos das amostras, não é possível distinguir, com confiança, tendências fracas de flutuações.

Tabela 4.2 - Proporção morfológica das galáxias nos aglomerados.

Região ao redor do Abell	Morfologia	Porcentagem (%)		
		<i>Red Sequence</i>	<i>Green Valley</i>	<i>Blue Cloud</i>
1024	Elíptica	76.2	66.7	18.2
	Espiral	23.8	33.3	81.8
2142	Elíptica	73.7	51.0	4.3
	Espiral	26.3	49.0	95.7
2067	Elíptica	78.4	45.9	8.5
	Espiral	21.6	54.1	91.5

Tabela 4.3 - Mediana do índice de cor $g - r$ das galáxias nos aglomerados.

Região ao redor do Abell	Morfologia	Índice de cor $g - r$		
		Red Sequence	Green Valley	Blue Cloud
1024	Elíptica	0.926	0.941	0.648
	Espiral	0.884	0.953	0.679
2142	Elíptica	0.930	0.938	0.847
	Espiral	0.902	0.863	0.688
2067	Elíptica	0.928	0.945	0.647
	Espiral	0.895	0.838	0.657

Tabela 4.4 - Mediana do índice de concentração na banda g das galáxias nos aglomerados.

Região ao redor do Abell	Morfologia	Índice de concentração		
		Red Sequence	Green Valley	Blue Cloud
1024	Elíptica	3.036	3.052	2.297
	Espiral	2.782	2.096	2.258
2142	Elíptica	3.109	3.015	2.322
	Espiral	2.701	2.496	2.177
2067	Elíptica	3.087	2.961	2.961
	Espiral	2.782	2.306	2.148

Tabela 4.5 - Mediana da taxa de formação estelar das galáxias nos aglomerados.

Região ao redor do Abell	Morfologia	Taxa de formação estelar (M_{\odot}/ano)		
		Red Sequence	Green Valley	Blue Cloud
1024	Elíptica	0.158	0.804	1.928
	Espiral	0.097	0.509	6.152
2142	Elíptica	0.143	0.700	2.328
	Espiral	0.133	0.708	3.327
2067	Elíptica	0.156	0.800	2.761
	Espiral	0.150	0.697	2.767

Tabela 4.6 - Proporção morfológica das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.

Região ao redor do Abell	Distância	Morfologia	Porcentagem (%)		
			Red Sequence	Green Valley	Blue Cloud
Filamentos					
1024	500 kpc	Elíptica	70.0	35.5	16.1
		Espiral	30.0	64.5	83.9
	1 Mpc	Elíptica	71.4	36.1	15.4
		Espiral	28.6	63.9	84.6
2142	500 kpc	Elíptica	71.6	38.9	17.0
		Espiral	28.4	61.1	83.0
	1 Mpc	Elíptica	62.3	14.3	14.5
		Espiral	37.7	85.7	85.5
2067	2 Mpc	Elíptica	67.8	14.8	12.2
		Espiral	32.2	85.2	87.8
	500 kpc	Elíptica	67.7	19.3	12.8
		Espiral	32.3	80.7	87.2
2067	1 Mpc	Elíptica	69.7	30.8	13.1
		Espiral	30.3	69.2	86.9
	2 Mpc	Elíptica	72.1	39.4	14.3
		Espiral	27.9	60.6	85.7
Vazios					
1024	500 kpc	Elíptica	72.7	38.8	16.3
		Espiral	27.3	61.2	83.7
	1 Mpc	Elíptica	72.6	39.7	16.9
		Espiral	27.4	60.3	83.1
2142	2 Mpc	Elíptica	73.7	34.6	14.4
		Espiral	26.3	65.4	85.6
	500 kpc	Elíptica	72.8	22.4	11.1
		Espiral	27.3	77.6	88.9
2067	1 Mpc	Elíptica	72.9	26.2	11.2
		Espiral	27.1	73.8	88.8
	2 Mpc	Elíptica	77.6	25.0	9.2
		Espiral	22.4	75.0	90.8
2067	500 kpc	Elíptica	69.8	31.1	12.0
		Espiral	30.2	68.9	88.0
	1 Mpc	Elíptica	68.0	27.7	11.0
		Espiral	32.0	72.3	89.0
	2 Mpc	Elíptica	70.4	35.0	8.6
		Espiral	29.6	65.0	91.4

Tabela 4.7 - Mediana do índice de cor $g - r$ das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.

Região ao redor do Abell	Distância	Morfologia	Índice de cor $g - r$		
			Red Sequence	Green Valley	Blue Cloud
Filamentos					
1024	500 kpc	Elíptica	0.914	0.871	0.532
		Espiral	0.869	0.843	0.631
	1 Mpc	Elíptica	0.915	0.861	0.533
		Espiral	0.887	0.840	0.616
2142	2 Mpc	Elíptica	0.913	0.827	0.569
		Espiral	0.875	0.837	0.630
	500 kpc	Elíptica	0.895	0.990	0.643
		Espiral	0.909	0.896	0.574
2067	1 Mpc	Elíptica	0.905	0.941	0.681
		Espiral	0.897	0.884	0.639
	2 Mpc	Elíptica	0.897	0.898	0.681
		Espiral	0.881	0.853	0.634
Vazios					
1024	500 kpc	Elíptica	0.901	0.834	0.615
		Espiral	0.879	0.746	0.647
	1 Mpc	Elíptica	0.899	0.872	0.637
		Espiral	0.876	0.816	0.652
2142	2 Mpc	Elíptica	0.898	0.853	0.667
		Espiral	0.875	0.824	0.637
	500 kpc	Elíptica	0.883	0.848	0.658
		Espiral	0.880	0.834	0.636
2067	1 Mpc	Elíptica	0.875	0.838	0.651
		Espiral	0.886	0.834	0.625
	2 Mpc	Elíptica	0.866	0.812	0.614
		Espiral	0.917	0.840	0.620
	500 kpc	Elíptica	0.890	0.866	0.664
		Espiral	0.885	0.837	0.634
	1 Mpc	Elíptica	0.890	0.851	0.694
		Espiral	0.890	0.835	0.625
	2 Mpc	Elíptica	0.904	0.890	0.604
		Espiral	0.898	0.836	0.626

Tabela 4.8 - Mediana do índice de concentração na banda g das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.

Região ao redor do Abell	Distância	Morfologia	Índice de concentração		
			Red Sequence	Green Valley	Blue Cloud
Filamentos					
1024	500 kpc	Elíptica	3.067	2.831	2.454
		Espiral	2.761	2.319	2.178
	1 Mpc	Elíptica	3.053	2.824	2.422
		Espiral	2.846	2.328	2.176
	2 Mpc	Elíptica	3.051	2.834	2.433
		Espiral	2.803	2.364	2.178
2142	500 kpc	Elíptica	3.079	2.906	2.634
		Espiral	2.757	2.702	2.231
	1 Mpc	Elíptica	3.075	2.887	2.653
		Espiral	2.757	2.515	2.203
	2 Mpc	Elíptica	3.074	3.011	2.598
		Espiral	2.660	2.477	2.173
2067	500 kpc	Elíptica	3.119	2.831	2.637
		Espiral	2.793	2.296	2.281
	1 Mpc	Elíptica	3.111	2.897	2.580
		Espiral	2.744	2.340	2.218
	2 Mpc	Elíptica	3.096	2.883	2.585
		Espiral	2.679	2.376	2.175
Vazios					
1024	500 kpc	Elíptica	3.011	2.856	2.428
		Espiral	2.771	2.405	2.177
	1 Mpc	Elíptica	3.014	2.942	2.494
		Espiral	2.730	2.405	2.179
	2 Mpc	Elíptica	2.992	2.966	2.495
		Espiral	2.632	2.409	2.164
2142	500 kpc	Elíptica	3.053	3.068	2.667
		Espiral	2.642	2.429	2.162
	1 Mpc	Elíptica	3.053	3.075	2.643
		Espiral	2.611	2.432	2.157
	2 Mpc	Elíptica	3.047	2.791	2.817
		Espiral	2.630	2.500	2.180
2067	500 kpc	Elíptica	3.075	2.912	2.627
		Espiral	2.733	2.380	2.160
	1 Mpc	Elíptica	3.076	2.894	2.668
		Espiral	2.733	2.382	2.161
	2 Mpc	Elíptica	3.081	3.097	2.655
		Espiral	2.780	2.474	2.168

Tabela 4.9 - Mediana da taxa de formação estelar das galáxias nos filamentos e vazios para diferentes distâncias aos eixos filamentares.

Região ao redor do Abell	Distância	Morfologia	Taxa de formação estelar (M_{\odot}/ano)		
			Red Sequence	Green Valley	Blue Cloud
Filamentos					
1024	500 kpc	Elíptica	0.150	0.511	1.247
		Espiral	0.158	0.869	2.831
	1 Mpc	Elíptica	0.151	0.404	1.291
		Espiral	0.132	0.759	2.667
2142	2 Mpc	Elíptica	0.149	0.409	1.321
		Espiral	0.128	0.682	2.443
	500 kpc	Elíptica	0.153	1.549	2.244
		Espiral	0.200	0.582	2.223
2067	1 Mpc	Elíptica	0.125	0.783	2.168
		Espiral	0.171	0.681	2.600
	2 Mpc	Elíptica	0.128	0.659	1.945
		Espiral	0.170	0.708	2.410
Vazios					
1024	500 kpc	Elíptica	0.131	0.564	2.393
		Espiral	0.122	0.345	2.951
	1 Mpc	Elíptica	0.132	0.558	1.560
		Espiral	0.128	0.468	2.541
2142	2 Mpc	Elíptica	0.130	0.622	1.521
		Espiral	0.147	0.748	2.799
	500 kpc	Elíptica	0.141	0.372	1.496
		Espiral	0.125	0.592	2.432
2067	1 Mpc	Elíptica	0.132	0.390	1.633
		Espiral	0.126	0.590	2.432
	2 Mpc	Elíptica	0.118	0.333	1.950
		Espiral	0.155	0.380	2.838
1024	500 kpc	Elíptica	0.116	0.565	1.982
		Espiral	0.161	0.818	2.355
	1 Mpc	Elíptica	0.116	0.564	1.968
		Espiral	0.163	0.875	2.173
2142	2 Mpc	Elíptica	0.107	0.435	2.350
		Espiral	0.163	0.916	2.128
	500 kpc	Elíptica	0.131	0.787	1.710
		Espiral	0.174	0.719	2.716
2067	1 Mpc	Elíptica	0.130	0.817	1.828
		Espiral	0.208	0.728	2.786
	2 Mpc	Elíptica	0.145	0.927	3.428
		Espiral	0.167	0.596	2.710

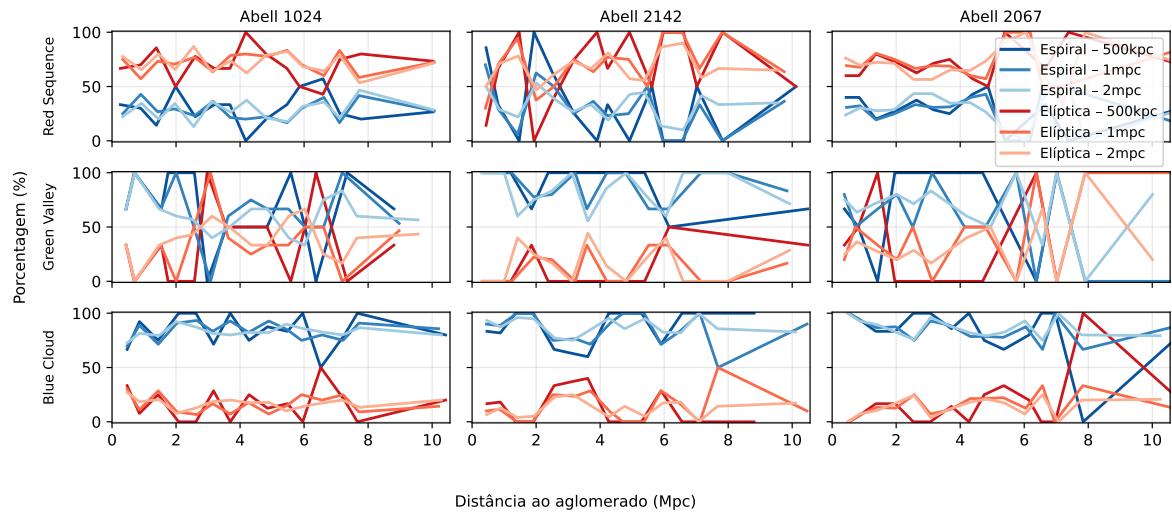


Figura 4.2: Proporção morfológica das galáxias ao longo dos filamentos para três diferentes distâncias aos eixos filamentares.

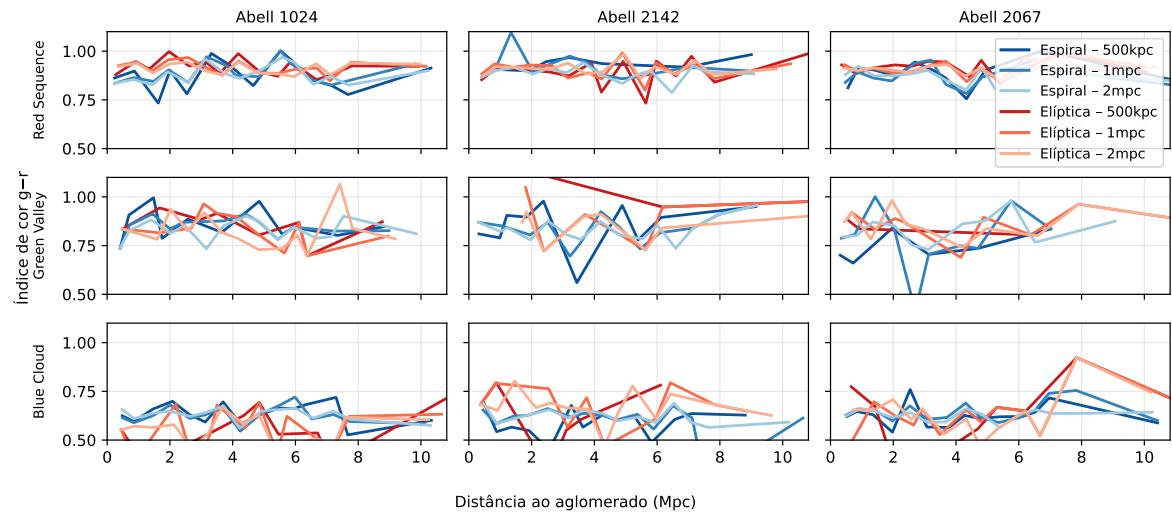


Figura 4.3: Mediana do índice de cor $g-r$ das galáxias ao longo dos filamentos para três diferentes distâncias aos eixos filamentares.

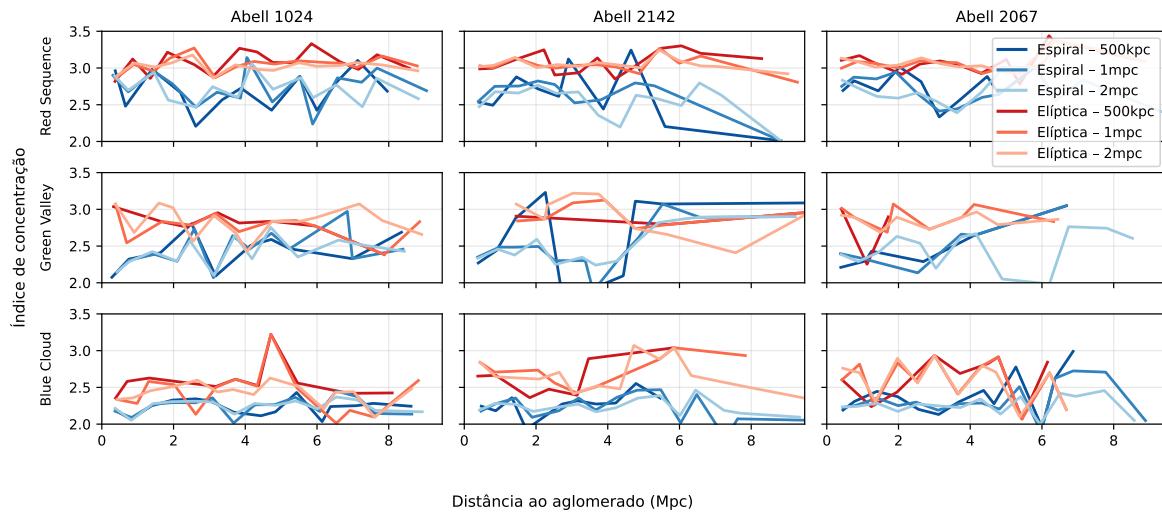


Figura 4.4: Mediana do índice de concentração na banda g das galáxias ao longo dos filamentos para três diferentes distâncias aos eixos filamentares.

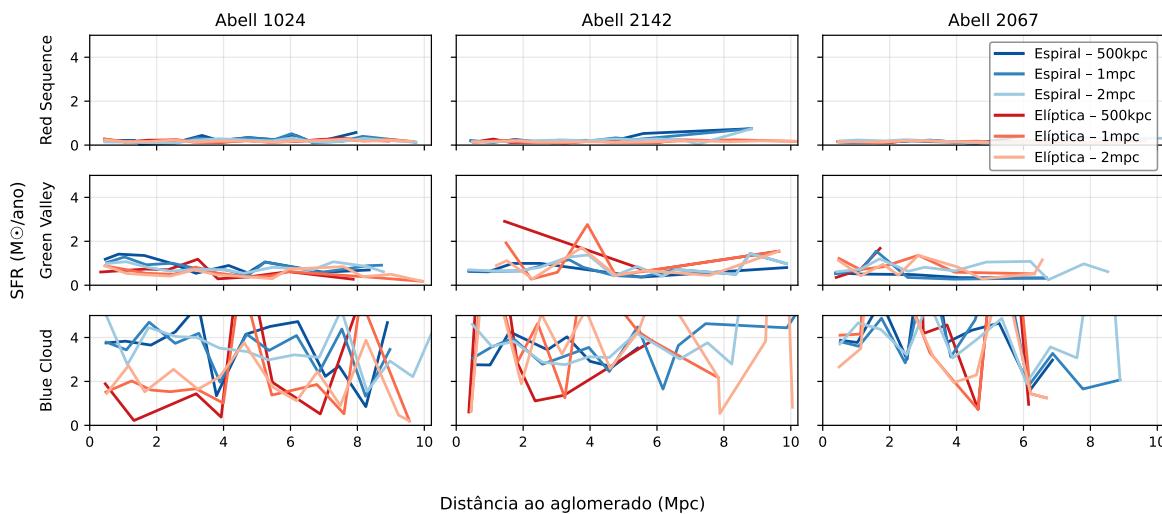


Figura 4.5: Mediana da taxa de formação estelar das galáxias ao longo dos filamentos para três diferentes distâncias aos eixos filamentares.

Capítulo 5

Conclusões

Esse estudo teve como principal objetivo analisar como um ambiente de densidade intermediária pode influenciar propriedades fotométricas das galáxias. Para isso, foram selecionadas regiões centradas em um raio de 5.5 graus ao redor dos aglomerados Abell 1024, 2142 e 2067. Os dados foram obtidos a partir do *Data Release 18* do *Sloan Digital Sky Survey* e dos catálogos *Galaxy Zoo 2* e MPA-JHU, sendo refinadas as amostras utilizando a *Red Sequence* e o *redshift* fotométrico.

Com as galáxias selecionadas, foram identificados os aglomerados e os filamentos das regiões usando os métodos *Friends-of-Friends* e *Subspace Constrained Mean Shift*, respectivamente, desconsiderando aqueles detectados dentro da região de borda de 20 arcmin. Foram determinadas as galáxias pertencentes aos filamentos para três distâncias perpendiculares aos eixos filamentares, 500 kpc, 1 Mpc e 2 Mpc. Além disso, as galáxias também foram divididas em populações galácticas, *Red Sequence*, *Green Valley* e *Blue Cloud*, e em tipos morfológicos, elípticas e espirais.

Após a análise das propriedades fotométricas, os resultados indicam que as galáxias elípticas estão majoritariamente na *Red Sequence*, sendo mais avermelhadas, concentradas e com menor formação estelar, enquanto as espirais predominam na região da *Blue Cloud*, apresentando cores mais azuladas, menor índice de concentração e maior taxa de formação estelar. As galáxias no *Green Valley*, em geral, apresentaram valores intermediários nas propriedades entre a *Red Sequence* e a *Blue Cloud*, como esperado para uma região de transição.

Nos filamentos, tanto perpendicularmente quanto ao longo dos eixos filamentares, não foram observadas variações significativas nas propriedades analisadas, apenas tendências pontuais. Esses resultados sugerem que, para os campos estudados, não foi possível de-

tectar influência do ambiente filamentar sobre as propriedades fotométricas das galáxias. Destaca-se que esse comportamento foi observado para todos os ambientes cósmicos, isto é, não foram identificadas dependências claras das propriedades analisadas em relação aos aglomerados, filamentos e vazios.

Essa conclusão é consistente com estudos, como Alpaslan et al. (2016) e Sarron et al. (2019), os quais apontam que padrões ambientais associados aos filamentos podem ser sutis e dependentes do tamanho amostral, da conectividade e da massa dos filamentos. Portanto, a ausência de forte dependência reforça que os efeitos ambientais associados aos filamentos podem ser fracos ou localizados, principalmente quando analisados em campos individuais.

Dessa forma, para melhorar a robustez das conclusões, é necessário ampliar a análise para amostras maiores e mais homogêneas, possibilitando, assim, uma avaliação mais sensível do impacto dos filamentos na evolução das galáxias.

Referências Bibliográficas

Abell G. O., The Distribution of Rich Clusters of Galaxies, *Astrophysical Journal Supplement*, 1958, vol. 3, p. 211

Alpaslan M., Driver S. P., Robotham A. S. G., Obreschkow D., Andrae E., Galaxy And Mass Assembly (GAMA): trends in galaxy colours, morphology, and stellar populations with large-scale structure, group, and pair environments, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 451, p. 3249

Alpaslan M., Driver S. P., Robotham A. S. G., Obreschkow D., Peacock J. A., Baldry I., Brough S., Cluver M. E., Davies L. J. M., Grootes M., Holwerda B., Kelvin L. S., Lara-López M. A., Loveday J., Taylor E. N., Galaxy And Mass Assembly (GAMA): the environmental dependence of galaxy properties, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, vol. 457, p. 2287

Bond J. R., Kofman L., Pogosyan D., How filaments of galaxies are woven into the cosmic web, *Nature*, 1996, vol. 380, p. 603

Boselli A., Gavazzi G., Environmental Effects on Late-Type Galaxies in Nearby Clusters, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2006, vol. 118, p. 517

Bremer M. N., Phillipps S., Kelvin L. S., De Propris R., Kennedy R., et al. Galaxy And Mass Assembly (GAMA): Morphological transformation of galaxies across the green valley, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, vol. 476, p. 12

Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Tremonti C., Kauffmann G., Heckman T., Brinkmann J., The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, vol. 351, p. 1151

Cautun M., van de Weygaert R., Jones B. J. T., Frenk C. S., Evolution of the cosmic web, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, vol. 441, p. 2923

Chen Y.-C., Genovese C. R., Wasserman L., Asymptotic theory for density ridges, Technical Report, Carnegie Mellon University, 2014

Chen Y.-C., Ho S., Freeman P. E., Genovese C. R., Wasserman L., Cosmic web reconstruction through density ridges: method and algorithm, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, vol. 454, p. 1140

Chen Y.-C., Ho S., Freeman P. E., Genovese C. R., Wasserman L., Detecting effects of filaments on galaxy properties in the Sloan Digital Sky Survey III, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017a, vol. 466, p. 1880

Chen Y.-C., Ho S., Freeman P. E., Genovese C. R., Wasserman L., The detection of galaxy morphology and star formation gradients across cosmic filaments, The Astrophysical Journal, 2017b, vol. 850, p. 188

Darvish B., Mobasher B., Sobral D., Scoville N., Aragon-Calvo M., A Comparative Study of Density Field Estimation for Galaxies: New Insights into the Evolution of Galaxies with Environment in COSMOS out to $z=3$, Astrophysical Journal, 2015, vol. 805, p. 121

Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S., White S. D. M., The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter, Astrophysical Journal, 1985, vol. 292, p. 371

Dressler A., Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies, Astrophysical Journal, 1980, vol. 236, p. 351

Eales S. A., Baes M., Bourne N., Bremer M. N., Brown M. J. I., Clark C., Clements D. L., De Vis P., Driver S., Dunne L., Dye S., Furlanetto C., Holwerda B., Ivison R. J., Kelvin L. S., Lara-Lopez M., Leeuw L., Loveday J., Maddox S., Michałowski M. J., Phillipps S., Robotham A., Smith D., Smith M., Valiante E., Van der Werf P., Wright A., The causes of the red sequence, the blue cloud, the green valley, and the green mountain, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, vol. 481, p. 1183

- Einasto M., Lietzen H., Tempel E., Gramann M., Liivamägi L. J., Einasto J., SDSS superclusters: morphology and galaxy content, *Astronomy & Astrophysics*, 2014, vol. 562
- Gunn J. E., Gott J. Richard I., On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution, *Astrophysical Journal*, 1972, vol. 176, p. 1
- Huchra J. P., Geller M. J., Groups of galaxies I. Nearby groups, *Astrophysical Journal*, 1982
- Kuutma T., Tamm A., Tempel E., Galaxy morphologies in different cosmic environments, *Astronomy & Astrophysics*, 2017, vol. 600, p. L6
- Larson R. B., Tinsley B. M., Caldwell C. N., The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies, *Astrophysical Journal*, 1980, vol. 237, p. 692
- Malavasi N., Aghanim N., Tresse L., Bertin E., Coupon J., Durkalec A., Laigle C., Moutard T., Galaxy quenching in filaments feeding clusters, *A&A*, 2022, vol. 664, p. A158
- Malavasi N., Arnouts S., Vibert D., de la Torre S., Coupon J., et al., VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS): galaxy segregation inside filaments at $z \simeq 0.7$, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, vol. 465, p. 3817
- Markevitch M., Vikhlinin A., Shocks and cold fronts in galaxy clusters, *Physics Reports*, 2007, vol. 443, p. 1
- Martínez H. J., Muriel H., Coenda V., Pre-processing in galaxy groups falling into massive clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, vol. 455, p. 127
- Moore B., Katz N., Lake G., Dressler A., Oemler A., Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies, *Nature*, 1996, vol. 379, p. 613
- Nipoti C., Treu T., Ciotti L., Stiavelli M., Galactic cannibalism and cold dark matter density profiles, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, vol. 355, p. 119
- Ozertem U., Erdoganmus D., Locally Defined Principal Curves and Surfaces, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, p. 1249

Peng S. J., Lilly S. J., Kovač K., Bolzonella M., Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution in SDSS and zCOSMOS and the Origin of the Schechter Function, *Astrophysical Journal*, 2010, vol. 721, p. 193

Porter S. C., Raychaudhury S., Pimbblet K. A., Drinkwater M. J., Star formation in galaxies falling into clusters along supercluster-scale filaments, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, vol. 388, p. 1152

Rojas R. R., Vogeley M. S., Hoyle F., Brinkmann J., Photometric properties of void galaxies in the Sloan Digital Sky Survey, *The Astrophysical Journal*, 2004, vol. 617, p. 50

Santoni S., De Petris M., Ferragamo A., Yepes G., Cui W., Impact of filaments on galaxy cluster properties in The Three Hundred simulation, *EPJ Web of Conferences*, 2024, vol. 293, p. 6

Sarron F., Martinet N., Durret F., Adami C., CFHTLS: Preprocessing of galaxies along cosmological filaments around clusters, *Astronomy & Astrophysics*, 2019, vol. 632, p. A49

Schawinski K., Urry C. M., Simmons B. D., Fortson L., Kaviraj S., et al. The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, vol. 440, p. 889

Schawinski K., Urry C. M., Simmons B. D., Fortson L., Kaviraj S., Keel W. C., Lintott C. J., Masters K. L., Nichol R. C., Sarzi M., Skibba R., The green valley is not a single population: Bulge-driven quenching and disk rejuvenation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, vol. 440, p. 889

Shimasaku K., Fukugita M., Doi M., Hamabe M., Ichikawa T., Okamura S., Sekiguchi M., Yasuda N., Brinkmann J., Csabai I., Ichikawa T., Ivezić Ž., Kunszt P., Nichol R. C., Szalay A. S., Watanabe M., Galaxy morphology and color in the Sloan Digital Sky Survey, *The Astrophysical Journal*, 2001, vol. 122, p. 1238

Springel V., White S. D. M., Jenkins A., Frenk C. S., Yoshida N., Gao L., Navarro J.,

Thacker R., et al., Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars, *Nature*, 2005, vol. 435, p. 629

Strateva I., Ivezić v., Knapp G. R., Narayanan V. K., Strauss M. A., et al., Color separation of galaxy types in the Sloan Digital Sky Survey imaging data, *Astronomical Journal*, 2001, vol. 122, p. 1861

Tempel E., Stoica R. S., Martínez V. J., Liivamägi L. J., Castellan G., Saar E., Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, vol. 438, p. 3465

Toomre A., Toomre J., Galactic Bridges and Tails, *Astrophysical Journal*, 1972, vol. 178, p. 623

Trussler J., Maiolino R., Maraston C., Peng Y., Thomas D., Goddard D., Lian J., Fontanot F., Starvation and outflows drive galaxy quenching, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, vol. 491, p. 5406–5434

van de Weygaert R., Platen E., Cosmic Voids: Structure, Dynamics and Galaxies, *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 2011, vol. 1, p. 41

Willett K. W., Lintott C. J., Bamford S. P., Masters K. L., Simmons B. D., Casteels K. R. V., Edmondson E. M., Fortson L. F., Kaviraj S., Keel W. C., Melvin T., Nichol R. C., Raddick M. J., Schawinski K., Simpson R. J., Skibba R. A., Smith A. M., Thomas D., Vandenberg J., Andreeescu D., Murray P., Sarzi M., Szalay A. S., Thomas D., Galaxy Zoo 2: Detailed morphological classifications for 304,122 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, vol. 435, p. 2835