

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA
BACHARELADO EM FÍSICA - ASTROFÍSICA

BRUNO PEREIRA FERNANDES

O AMBIENTE DAS GALÁXIAS COMPACTAS MASSIVAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PORTO ALEGRE
2021

BRUNO PEREIRA FERNANDES

O AMBIENTE DAS GALÁXIAS COMPACTAS MASSIVAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Bacharelado em Física - Astrofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Allan Schnorr Müller
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

PORTO ALEGRE
2021

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente minha família pela base e apoio dados em todos estes anos.

Agradecer à instituição UFRGS pela estrutura, especialmente à todos os professores que contribuíram para o meu aprendizado.

Por fim, agradecer ao meu orientador pela paciência, instrução e experiência repassada neste tempo que trabalhamos juntos.

“Nobody ever figures out what life is all about, and it doesn't matter. Explore the world. Nearly everything is really interesting if you go into it deeply enough.” — Richard P. Feynman.

RESUMO

As galáxias podem ser classificadas entre àquelas que formam estrelas (*star-forming*) e as que não formam mais estrelas em quantidades significativas (quiescentes). No passado as galáxias quiescentes eram em sua maioria compactas enquanto nos dias de hoje são tipicamente estendidas. Estudos apontam que a densidade numérica das galáxias compactas tende a diminuir conforme z diminui e esta queda está relacionada ao crescimento de galáxias compactas via fusões menores. Como fusões de galáxias são mais comuns em certos ambientes, como grupos, enquanto são raras em outros, como aglomerados, levantou-se a hipótese de que talvez o ambiente tenha influência na sobrevivência e manutenção de seu tamanho. Extraímos uma amostra de galáxias quiescentes massivas ($sSFR < 10^{-11}$ e $M_* > 10^{10}$) do levantamento astronômico SDSS. Comparamos essa amostra a uma amostra de controle composta por galáxias quiescentes não compactas, pareada em massa estelar e *redshift*. Comparando a distância de cada galáxia ao centro do halo de matéria escura, encontramos que as galáxias compactas não possuem uma preferência por uma posição específica dentro dos aglomerados, tendo uma distribuição semelhante às galáxias de controle. Quando comparamos a fração de galáxias em agrupamentos de diferentes massas, encontramos que há um deficit de galáxias compactas nos grupos de mais baixa massa, para massas maiores, não há diferença significativa nas quantidades de galáxias compactas e de controle. O ambiente parece ter uma influência neste caso, pois ambientes mais massivos podem evitar o crescimento das galáxias via fusões. Analisando suas vizinhas mais próximas, descobrimos que elas são mais velhas e mais ricas em metais do que as vizinhas das galáxias de controle.

Palavras-chave: Galáxias Compactas Massivas. Aglomerados de Galáxias. Extragaláctica.

ABSTRACT

Galaxies can be divided into two groups, those which actively form stars (star-forming) and those which no longer form stars (quiescent). In the past, quiescent galaxies typically were compact while in the present day they are typically extended. Several studies shows that the number density of the massive compact galaxies decreases with z and this is related to the growth of individual compact galaxies through dry minor mergers. As galaxy mergers are more frequent in galaxy groups while they are rare in galaxy clusters, it is possible that the environment affects the chances of a compact galaxy to survive to the present day. We extract a sample of quiescent massive galaxies ($sSFR < 10^{-11}$ and $M_* > 10^{10}$) from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). The properties of galaxies are compared to those of a control sample of non-compact galaxies, matched in stellar mass and redshift. Comparing the distance of each galaxy to the center of the host halo, we find that the compact galaxies don not have a preference for a specific position inside the cluster, having a similar spatial distribution to the control galaxies. Comparing the fraction of galaxies in clusters of different mass, we find that there is a deficit of compact galaxies in low-mass groups, while at higher masses, there is no significantly difference between the two samples. The environment seems to have an influence in this case, as more massive environments could inhibit galaxy mergers. Examing to the nearest galaxy, we find that the neighbors of compact galaxies are older and more metal rich.

Keywords: Massive Compact Galaxies. Cluster of Galaxies. Extragalactic.

LISTA DE FIGURAS

<p>Figura 1 – Na sequência de Hubble classificamos as galáxias pela sua morfologia. As elípticas (E) estão divididas pela sua excentricidade, onde o número que acompanha a letra E é a excentricidade multiplicada por 10. Na bifurcação, dividindo os dois lados, temos as galáxias lenticulares (S0). O caminho divide-se em dois nas galáxias espirais (S) pois ela pode ser barrada (SB) ou não (S). Claramente percebemos a divisão em formato de garfo pois as galáxias dividem-se em dois grandes grupos, as elípticas e as espirais. Entre esses dois grupos, encontram-se as galáxias lenticulares.</p>	1
<p>Figura 2 – O diagrama de cor das galáxias foi extraída de Schawinski et al. (2014). Na região azul encontram-se as galáxias <i>star-forming</i> e na parte superior em vermelho, estão em geral as galáxias quiescentes. As retas verdes delimitam o chamado vale verde, onde não temos uma definição clara quanto à classificação da galáxia pela sua cor.</p>	2
<p>Figura 3 – Relação entre $\log(R_e)$ e $\log(\sigma_e)$. Em vermelho está a seleção das galáxias da nossa amostra de compactas utilizando o critério de estar a 2σ abaixo da reta e em verde a seleção das galáxias de controle, estando a $\pm 0.5\sigma$ da reta.</p>	5
<p>Figura 4 – Relação entre $\log \sigma_e$ e $\log(M_*/M_\odot)$. Em vermelho está a seleção das galáxias da nossa amostra de compactas utilizando o critério de estar a 2σ acima da reta e em verde a seleção das galáxias de controle, estando a $\pm 0.5\sigma$ da reta.</p>	6
<p>Figura 5 – A massa e o <i>redshift</i> das galáxias são semelhantes. Quase não existe diferenças entre as distribuições, resultado do nosso match pela técnica PSM.</p>	7
<p>Figura 6 – O raio efetivo e a dispersão de velocidades das duas amostras são diferentes devido aos critérios de seleção que escolhemos.</p>	7
<p>Figura 7 – Podemos visualizar no visível as galáxias compactas. As imagens estão na mesma escala de $0.2''/px$.</p>	8
<p>Figura 8 – Podemos visualizar no visível as galáxias de controle. As imagens estão na mesma escala e $0.2''/px$.</p>	8
<p>Figura 9 – A esquerda está a distância projetada para as vizinhas mais próximas e na direita as quartas vizinhas mais próximas.</p>	9
<p>Figura 10 – Percebemos que não existe diferença significativa entre as duas distribuições, dessa maneira tanto as compactas quanto as de controle estão localizadas nos mesmos pontos.</p>	10
<p>Figura 11 – Quando analisamos a distribuição de massa dos halos dos grupos percebemos que há um excesso de galáxias compactas em grupos mais massivos que os que as de controle habitam.</p>	11

Figura 12 – Quando comparamos as distribuições de <i>T-type</i> das duas amostras, percebemos que a diferença é significativa. Há um número significativo de galáxias <i>late-type</i> na amostra de controle, já para as compactas há uma fração maior de <i>early-type</i> em sua população.	12
Figura 13 – A diferença entre as distribuições é significativa, assim podemos afirmar que há um excesso de galáxias lenticulares na amostra de compactas. Na amostra de controle parece haver um misto de galáxias tanto elípticas quanto lenticulares.	12
Figura 14 – A massa das galáxias vizinhas mais próxima não aparenta ter uma diferença significativa. Importante lembrar que a massa das galáxias vizinhas não está pareada.	13
Figura 15 – Mesmo quando analisamos as quartas galáxias mais próximas, também não aparenta ter uma diferença significativa entre as distribuições. Novamente, a massa das galáxias vizinhas não está pareada.	13
Figura 16 – A idade das vizinhas mais próxima só é significativa quando pesada pela luminosidade. Neste caso as galáxias compactas são mais velhas.	14
Figura 17 – As quartas galáxias mais próxima das compactas tendem a ter uma diferença significativa na idade pesada pela luminosidade.	14
Figura 18 – Para as vizinhas mais próximas das galáxias compactas, tanto a metalicidade pesada pela luminosidade quanto pela massa possuem uma diferença significativa. As vizinhas das compactas tendem a ser mais ricas em metais do que as de controle.	15
Figura 19 – Quando avaliamos as quartas galáxias mais próxima temos o mesmo resultado. A diferença é significativa tanto para o peso em luminosidade quanto em massa.	15
Figura 20 – O parâmetro <i>T-type</i> das vizinhas mais próxima é significativo. Em geral as vizinhas das compactas possuem um excesso em $T-type \leq 0$	16
Figura 21 – Percebemos que a diferença não é significativa entre as duas distribuições.	16
Figura 22 – Para as quartas vizinhas mais próxima não há diferença significativa entre as duas distribuições no parâmetro <i>T-type</i>	17
Figura 23 – Igualmente quando vamos analisar as distribuições da probabilidade das galáxias serem lenticulares para as quartas galáxias mais próxima não possui uma diferença significativa.	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Separamos a amostra das galáxias compactas e de controle em <i>bins</i> de massa ($\Delta \log M/M_* = 0,5$). Para cada <i>bin</i> , contamos o número de galáxias que são centrais e satélites, comparando a amostra das compactas com a de controle para verificarmos se existe alguma diferença que possa ser explicada pela massa. No caso das galáxias satélites, comparamos também o número de galáxias a diferentes distâncias do centro. Contabilizamos também as galáxias de Campo.	18
---	----

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 O CARÁTER BIMODAL DAS GALÁXIAS	1
1.2 O AMBIENTE E A SOBREVIVÊNCIA DE GALÁXIAS COMPACTAS	3
2 – METODOLOGIA	4
2.1 SELEÇÃO DA AMOSTRA DE COMPACTAS E DE CONTROLE	5
2.1.1 Amostra de Galáxias Compactas	5
2.1.2 Amostra de Controle	6
2.2 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE	7
2.2.1 Determinação da Distância ao Centro da estrutura	8
2.2.2 Separação de Galáxias em Grupo/Aglomerado e Campo	8
2.2.3 Classificação em Centrais e Satélites	9
2.3 GALÁXIAS VIZINHAS	9
2.3.1 Critérios de Seleção das Vizinhas	9
3 – RESULTADOS	10
3.1 CARACTERÍSTICAS DAS GALÁXIAS COMPACTAS QUIESCENTES	10
3.1.1 Classificação em Centrais e Satélites	10
3.1.2 Morfologia	11
3.2 CARACTERÍSTICAS DAS GALÁXIAS VIZINHAS	12
3.2.1 Massa	13
3.2.2 Idade	14
3.2.3 Metalicidade	15
3.2.4 Morfologia	16
4 – DISCUSSÃO	19
4.1 A LOCALIZAÇÃO DA GALÁXIA NO AGLOMERADO	19
4.2 PROPRIEDADES DAS VIZINHAS DAS GALÁXIAS COMPACTAS	20
5 – CONCLUSÃO	21
5.1 PERSPECTIVAS	21
Referências	22

1 INTRODUÇÃO

1.1 O CARÁTER BIMODAL DAS GALÁXIAS

Quando pensamos na classificação das galáxias, geralmente pensamos na classificação morfológica desenvolvida pelo astrônomo americano Edwin Powell Hubble (1899 - 1953) em 1926. A chamada Sequência de Hubble separa as galáxias em *early* e *late type*, organizada no formato de um garfo, onde os objetos encaixam-se também de acordo com o formato de sua estrutura central. As elípticas (E) estão divididas de acordo com a sua excentricidade, onde o número associado à letra E corresponde a sua excentricidade ϵ multiplicado por 10. Na bifurcação nós temos as galáxias lenticulares (S0), que possuem um centro brilhante e um disco, mas não possuem braços espirais. Já as espirais (S) são divididas em barradas (SB) e não barradas, nome que possui origem na existência de uma estrutura em forma de barra em seu disco.

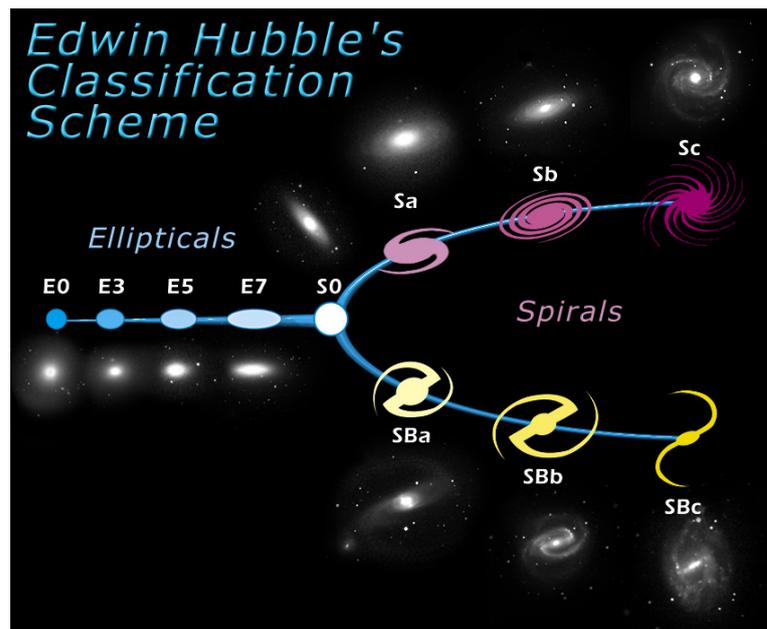


Figura 1 – Na sequência de Hubble classificamos as galáxias pela sua morfologia. As elípticas (E) estão divididas pela sua excentricidade, onde o número que acompanha a letra E é a excentricidade multiplicada por 10. Na bifurcação, dividindo os dois lados, temos as galáxias lenticulares (S0). O caminho divide-se em dois nas galáxias espirais (S) pois ela pode ser barrada (SB) ou não (S). Claramente percebemos a divisão em formato de garfo pois as galáxias dividem-se em dois grandes grupos, as elípticas e as espirais. Entre esses dois grupos, encontram-se as galáxias lenticulares.

No entanto, há outras formas de classificar galáxias, uma delas é de acordo com sua cor. Estudos extragalácticos mostraram que as populações de galáxias do Universo Local são fortemente bimodais em cor (Strateva et al., 2001; Baldry et al., 2004). No diagrama cor-magnitude, as galáxias são divididas em dois principais grupos: a chamada *blue cloud*, cujas

galáxias são azuis e possuem uma formação estelar ativa, sendo chamadas de *star-forming*, e as da *red sequence*, que é composta por galáxias que, em geral, não formam mais novas estrelas, são vermelhas e são chamadas de galáxias quiescentes. A Fig. 2 nos mostra o diagrama cor-magnitude. A partir destas definições surge uma nova maneira de se classificar as galáxias, entre aquelas que formam estrelas e as que são quiescentes.

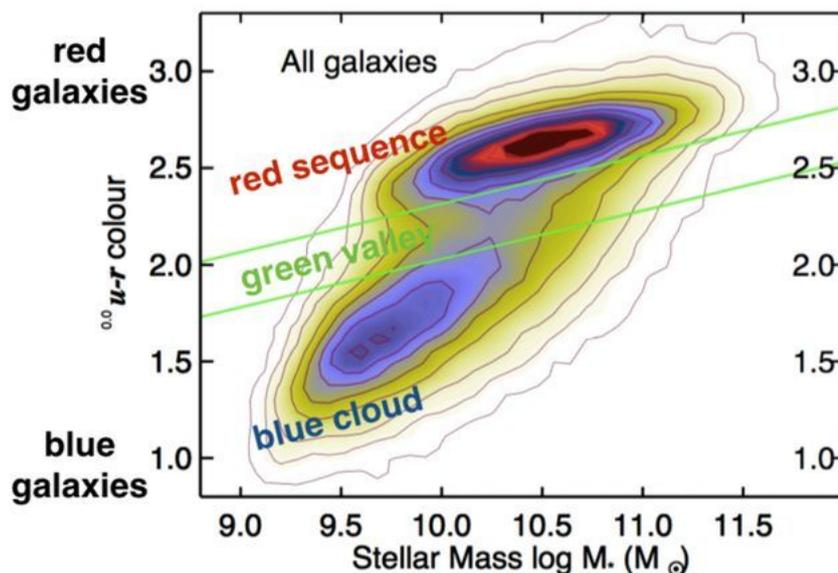


Figura 2 – O diagrama de cor das galáxias foi extraída de [Schawinski et al. \(2014\)](#). Na região azul encontram-se as galáxias *star-forming* e na parte superior em vermelho, estão em geral as galáxias quiescentes. As retas verdes delimitam o chamado vale verde, onde não temos uma definição clara quanto à classificação da galáxia pela sua cor.

Comparando galáxias *star-forming* com as galáxias quiescentes de mesma massa, percebemos que as últimas possuem uma maior razão de bojo-massa ([Bamford et al., 2009](#); [Bluck et al., 2014](#)), maior densidade superficial de massa dentro de 1 *kpc* ([Charbonnier et al., 2017](#)), tamanhos menores ([Shen et al., 2003](#)) e perfis de luz mais concentrados ([Kauffmann et al., 2003](#); [Baldry et al., 2006](#); [Driver et al., 2006](#)).

O caráter bimodal em cor das galáxias também está presente em populações de galáxias que estão localizadas em altos *redshifts*. Quando comparamos esta população de galáxias quiescentes em alto *redshift* com suas contrapartes no Universo Local, percebemos que possuem diferenças. São extremamente compactas ([Buitrago et al., 2008](#); [van Dokkum et al., 2008](#); [Damjanov et al., 2009](#)) e possuem um raio de meia-luz significativamente menor, da ordem de 1 – 2 *kpc* ([McLure et al., 2013](#); [van de Sande et al., 2013](#); [van der Wel et al., 2014](#)).

A densidade numérica das galáxias compactas sofre alterações em diferentes *redshifts*. Percebemos que conforme diminui o *redshift*, a densidade numérica diminui drasticamente ([Poggianti et al., 2013](#)), nos mostrando que poucas galáxias mantêm-se compactas, ao mesmo tempo que novas galáxias quiescentes compactas surgem em um número cada vez menor. Acredita-se que o principal processo físico responsável pela queda na densidade numérica é o crescimento de galáxias quiescentes compactas via fusões menores pobres em gás.

1.2 O AMBIENTE E A SOBREVIVÊNCIA DE GALÁXIAS COMPACTAS

O papel do ambiente na formação e sobrevivência de galáxias compactas é tema de muitos estudos. Sabe-se que o ambiente possui uma importância significativa na acreção de massa da galáxia. As galáxias satélites passam por menos fusões, principalmente em ambientes densos, fazendo então com que seu crescimento em tamanho fique constante. Dessa maneira, espera-se que galáxias compactas em $z \sim 0$ sejam encontradas preferencialmente em ambientes mais densos.

No Universo Local, propriedades internas como a luminosidade, cor e a morfologia são correlacionadas com a densidade do ambiente em que a galáxia se encontra (Park et al., 2007). Damjanov et al. (2015) analisaram o local onde formam-se sistemas massivos compactos entre $0 < z < 2$ e encontraram que uma grande fração são subestruturas de grupos massivos e aglomerados de galáxias. Valentinuzzi et al. (2010) encontra que galáxias compactas massivas ($M_{\star} > 3 \times 10^{10} M_{\odot}$ e $\langle R_e \rangle = 1,61 \pm 0,29 \text{ kpc}$) preferem regiões mais densas. Ainda aponta uma possível dependência entre o tamanho dos objetos e o ambiente. Peralta de Arriba et al. (2016) encontra que, tanto galáxias compactas quiescentes (Blanton et al., 2005) observadas quanto simuladas, tendem a estar localizadas perto das regiões centrais dos aglomerados. Estes resultados são condizentes com a hipótese que altas densidades inibem a ocorrência de fusões, fazendo com que as galáxias compactas permaneçam compactas.

No entanto, a preferência das galáxias compactas por regiões mais densas ainda é um tema controverso. Tortora et al. (2020), utilizando uma amostra das galáxias compactas massivas ($R_e < 1.5 \text{ kpc}$ e $M_{\star} > 8 \times 10^{10} M_{\odot}$) e, comparando a galáxias massivas de tamanho normal, mostraram que ambas estas populações são igualmente mais abundantes em aglomerados, ou seja, as galáxias compactas massivas não possuem preferência por regiões mais densas por serem compactas, mas porque habitam os mesmos ambientes que galáxias quiescentes estendidas de massa similar.

O objetivo deste trabalho é entender o papel do ambiente na sobrevivência de galáxias compactas quiescentes no Universo Local. Compararemos as propriedades do ambiente ocupado por galáxias compactas com as de uma amostra de controle composta por galáxias quiescentes estendidas de mesma massa. As galáxias compactas analisadas nesse estudo ocupam um amplo intervalo de massas ($M_{\star} \approx 10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$), estendendo o estudo do ambiente desses objetos para massas menores do que as analisadas em trabalhos anteriores.

No Cap. 2 detalharemos a origem dos dados analisados, a construção das amostras e a caracterização do ambiente. Os resultados obtidos serão apresentados no Cap. 3 e discutidos no Cap. 4. Por fim iremos resumir e apontar os principais pontos trabalhados no Cap. 5. Neste trabalho utilizamos uma cosmologia simplificada, com $\Omega_M = 0,3$, $\Omega_{\Lambda} = 0,7$ e $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

2 METODOLOGIA

As amostras de galáxias analisadas neste trabalho foram extraídas do mais ambicioso levantamento astronômico em andamento da atualidade, o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), projeto que fora iniciado em 2000 e está atualmente em sua quarta versão. O Sloan encontra-se em seu décimo sexto *data release* (Ahumada et al., 2020), contém dados espectrais de cerca de 2,6 milhões de galáxias e varreu uma área de 14.555 deg^2 .

As massas estelares e taxas de formação estelar utilizadas neste estudo são oriundas do catálogo *GALEX-SDSS-WISE LEGACY CATALOG 2* (Salim et al., 2016), no qual estão contidos dados para mais de 700.000 galáxias do SDSS para *redshifts* (z) abaixo de 0,3, cobrindo cerca de 90% dos objetos observados pelo Sloan. Essas propriedades foram obtidas a partir do ajuste da distribuição espectral de energia (SED, do inglês *Spectral Energy Distribution*), combinando a fotometria dos levantamentos astronômicos GALEX, SDSS e WISE, seguindo o modelo Bayesiano descrito em Salim et al. (2007).

O semi-eixo maior da elipse de meia luz ou raio efetivo (R_e) foi extraído do catálogo de decomposições Bojo-Disco de Simard et al. (2011). A decomposição foi realizada ajustando duas funções de Sérsic, sendo uma com $n = 1$, que corresponde ao disco, e outra com n livre, que corresponde ao bojo, ao perfil de luz nas bandas g e r . Os parâmetros são fornecidos para uma amostra de 1.123.718 galáxias da área *Legacy* do *SDSS-DR7* (Abazajian et al., 2009).

As informações sobre a morfologia das galáxias são provenientes de Domínguez Sánchez et al. (2018), no qual apresentam um catálogo morfológico de cerca de 670.000 galáxias, contendo informações sobre o *T-type*, relacionado à sequência de Hubble, além de outros parâmetros. O catálogo morfológico foi construído combinando classificação visual precisa com *machine learning*. Como a classificação em *T-type* não separa com precisão galáxias elípticas e lenticulares, é provido um parâmetro que indica a probabilidade de uma dada galáxia ser classificada como S0.

Os *redshifts* e a dispersão de velocidades estelar (σ_e) foram extraídos do catálogo espectroscópico do SDSS. As magnitudes g , r e i foram extraídas do catálogo fotométrico do SDSS.

As propriedades da população estelar das galáxias foram medidas seguindo os passos descritos em Schnorr-Müller et al. (2021). Em resumo, as idades e metalicidades das galáxias foram derivadas através da análise da síntese da população estelar (SPS, do inglês *stellar population synthesis*) usando o código STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005) com os modelos de Vazdekis et al. (2015). O STARLIGHT foi executado utilizando 15 *bins* de idade, no intervalo de 30 *Myr* e 13,5 *Gyr* e os 6 *bins* da metalicidade variando entre $[M/H] = -1,3$ até +0,4. O ajuste foi executado na região de comprimento de onda de 3900 até 5800 Å para evitar regiões do espectro sensíveis à variações na Função de Massa Inicial (IMF, do inglês *Initial Mass Function*).

2.1 SELEÇÃO DA AMOSTRA DE COMPACTAS E DE CONTROLE

2.1.1 Amostra de Galáxias Compactas

Como queremos selecionar galáxias quiescentes, a taxa de formação estelar específica (sSFR) é um importante critério. Consideramos como quiescentes as galáxias com $sSFR < 10^{-11}$. Buscamos galáxias que são massivas, portanto devemos aplicar um critério de seleção na massa estelar. Definimos como galáxias massivas aquelas que possuem $M_* > 10^{10} M_\odot$.

O catálogo de [Simard et al. \(2011\)](#) não fornece informações sobre a qualidade dos ajustes, por isso decidimos remover objetos com decomposição bojo-disco obviamente ruins. Excluímos da amostra as galáxias com $R_e > 40 \text{ kpc}$. A partir desta seleção, restaram 223.606 galáxias das 519.548 iniciais.

Segundo [Schnorr-Müller et al. \(2021\)](#), selecionaremos galáxias compactas baseado em seu tamanho para uma dada dispersão de velocidades. Na Fig. 3 apresentamos a distribuição de galáxias quiescentes do SDSS no plano $\log \sigma_e \times \log R_e$. A relação entre estas duas propriedades foi determinada fazendo-se um ajuste linear utilizando o pacote `sklearn.linear_model` da linguagem de programação *Python*. Traçamos a reta encontrada a partir do ajuste (em cor preta) no gráfico.

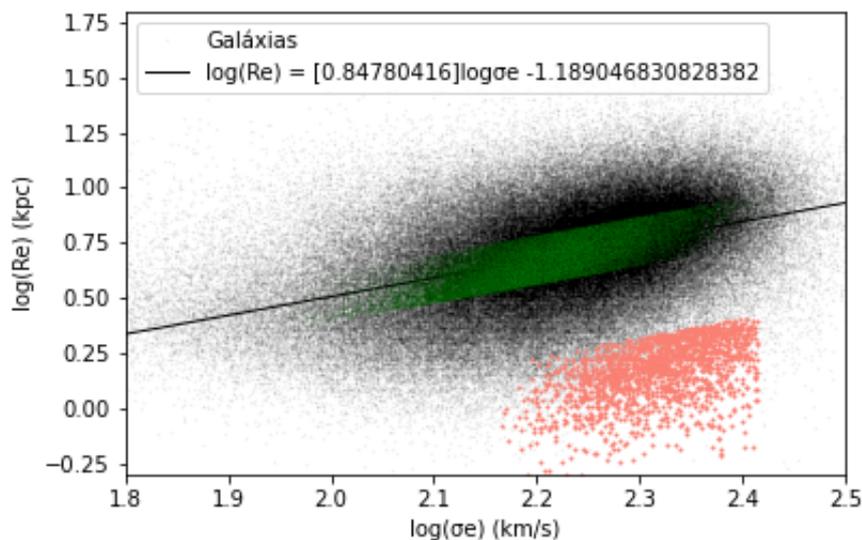


Figura 3 – Relação entre $\log(R_e)$ e $\log(\sigma_e)$. Em vermelho está a seleção das galáxias da nossa amostra de compactas utilizando o critério de estar a 2σ abaixo da reta e em verde a seleção das galáxias de controle, estando a $\pm 0.5\sigma$ da reta.

Na Fig. 4 mostramos a distribuição de galáxias quiescentes no plano $\log M_* \times \log \sigma_e$. Definimos então como galáxias compactas àquelas que ao mesmo tempo possuem raios efetivos a 2σ abaixo da reta da Fig. 3, sendo σ o erro quadrático do ajuste, e sua dispersão de velocidades efetiva σ_e esteja a 2σ acima da reta da Fig 4. Esse segundo critério foi adotado porque, como mostrado em [Schnorr-Müller et al. \(2021\)](#), galáxias com altas dispersões de

velocidades e pequenos raios, em geral, possuem σ_e muito maior que galáxias não compactas de mesma massa. Desta maneira, ao impor este critério também a galáxias com menor σ_e , estamos selecionando objetos com estruturas semelhantes em um amplo intervalo de dispersão de velocidades e massas estelares.

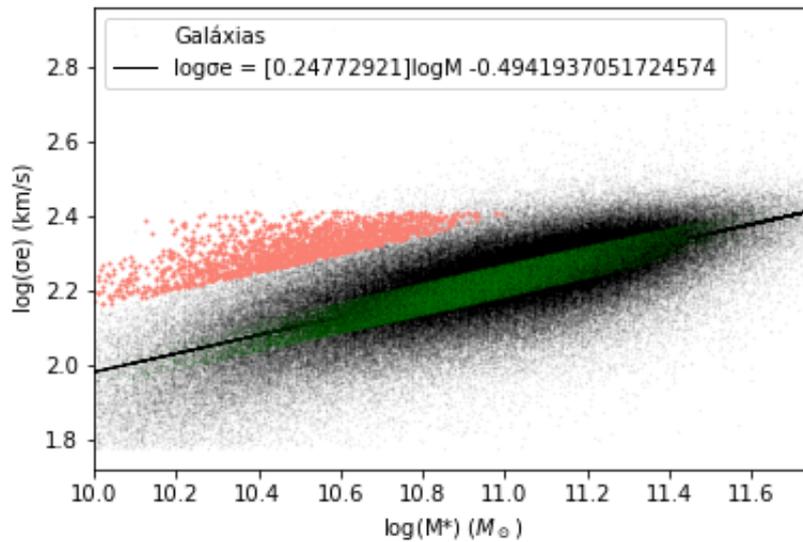


Figura 4 – Relação entre $\log \sigma_e$ e $\log(M_*/M_\odot)$. Em vermelho está a seleção das galáxias da nossa amostra de compactas utilizando o critério de estar a 2σ acima da reta e em verde a seleção das galáxias de controle, estando a $\pm 0.5\sigma$ da reta.

É importante ressaltar que, devido a relação da dispersão de velocidade com a idade (Graves; Faber; Schiavon, 2009), quando selecionamos a amostra de tal maneira que possua alto σ_e para uma dada massa, é esperado que essas galáxias sejam mais velhas que galáxias de mesma massa e menor σ_e . O mesmo ocorre ao selecionar galáxias com pequeno R_e , pois é conhecido que para uma dada massa estelar, as galáxias compactas tendem a ser mais velhas.

2.1.2 Amostra de Controle

A fim de identificar possíveis diferenças entre os ambientes em que se encontram galáxias quiescentes compactas e galáxias quiescentes típicas, construímos uma amostra de controle pareada em massa e em *redshift*, composta por galáxias que estejam dentro de $\pm 0,5\sigma$ da reta em ambas as relações $\log M \times \log \sigma_e$ e $\log \sigma_e \times \log R_e$.

Já é conhecido da literatura que o ambiente onde uma galáxia encontra-se é relacionado com sua massa estelar. Portanto, para verificar se as galáxias quiescentes compactas encontram-se preferencialmente em algum ambiente, é necessário que se compare a sua distribuição em diferentes ambientes com galáxias quiescentes não compactas de mesma massa estelar. Para isso, construiremos uma amostra de controle utilizando a técnica *Propensity Score Matching* (PSM) (ROSENBAUM; RUBIN, 1983). Utilizamos o pacote *MATCHIT* (HO et al., 2011), escrito na linguagem de programação R (R Core Team, 2015). Essa técnica nos permite

selecionar uma amostra de controle que possua a distribuição de massa e z semelhantes as da amostra de compactas. O resultado desta seleção é encontrado na Fig. 5.

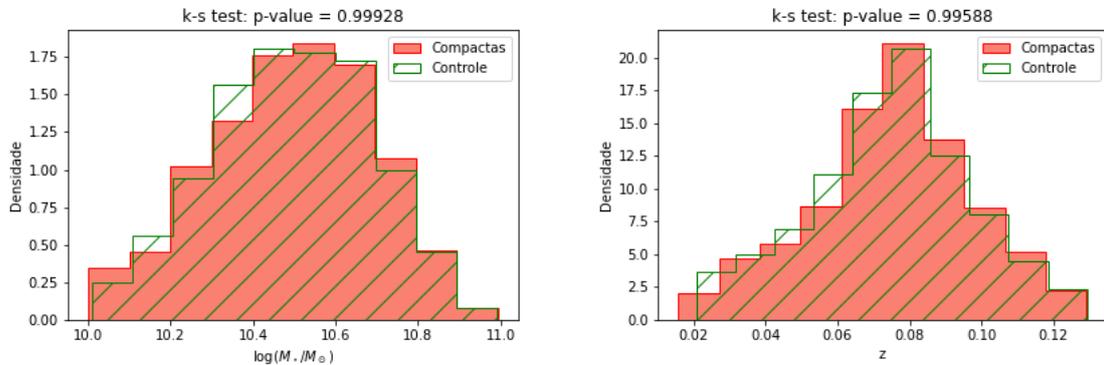


Figura 5 – A massa e o *redshift* das galáxias são semelhantes. Quase não existe diferenças entre as distribuições, resultado do nosso match pela técnica PSM.

Percebemos pela Fig. 6 que, como esperado, as galáxias compactas da nossa amostra são menores que as galáxias de controle e as primeiras possuem dispersão de velocidade maiores que as segundas.

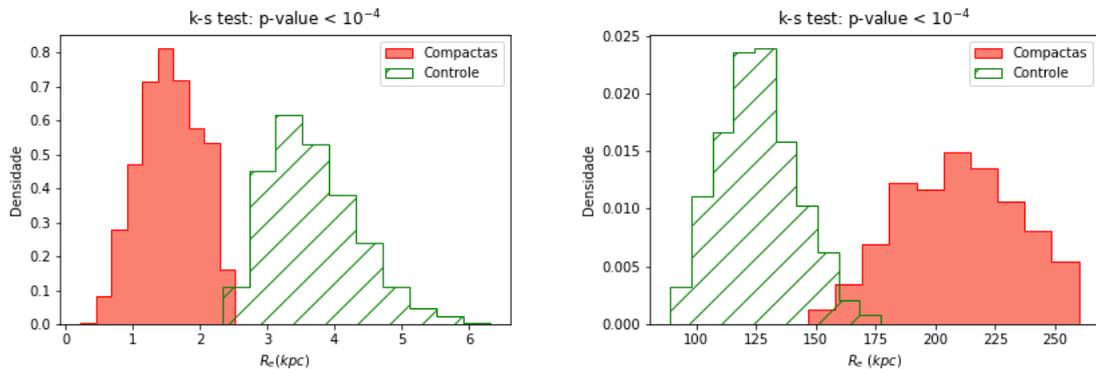


Figura 6 – O raio efetivo e a dispersão de velocidades das duas amostras são diferentes devido aos critérios de seleção que escolhemos.

Na Fig. 7 apresentamos imagens de galáxias compactas e na Fig. 8 imagens de galáxias de controle típicas de nossa amostra, sendo ambas extraídas do SDSS. Há uma galáxia de controle para cada galáxia compacta, tendo então um total de 1.490 galáxias em ambas as amostras.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE

De maneira semelhante a feita em [Trevisan et al. \(2021\)](#), caracterizamos o ambiente em que as galáxias compactas quiescentes estão inseridas no contexto local, estudando as vizinhas mais próximas, e em maior escala, entendendo como elas estão distribuídas dentro de seus grupos.



Figura 7 – Podemos visualizar no visível as galáxias compactas. As imagens estão na mesma escala de $0.2''/px$.



Figura 8 – Podemos visualizar no visível as galáxias de controle. As imagens estão na mesma escala e $0.2''/px$.

2.2.1 Determinação da Distância ao Centro da estrutura

A partir do catálogo de grupos de [Yang et al. \(2007\)](#) e utilizando a técnica apresentada em [Trevisan, Mamon e Stalder \(2017\)](#), definimos como r_{vir} de um grupo o raio r_{100} , que é o raio de uma esfera que cerca uma região com densidade 100 vezes maior que a densidade *crítica* do Universo. Seguindo o Apêndice A de [Trevisan, Mamon e Khosroshahi \(2017\)](#) deduzimos primeiramente $r_{200,m}$, o raio de uma esfera que cerca uma região 200 vezes mais densa do que a densidade *média* do Universo, a partir das massas $M_{200,m}$ obtidas do catálogo de Yang e assumindo um perfil de densidade de Navarro-Frenk-White, subsequentemente obtendo $r_{100,c}$, o raio de uma esfera cuja densidade média é 100 vezes a densidade *crítica* do Universo.

2.2.2 Separação de Galáxias em Grupo/Aglomerado e Campo

Para a análise do ambiente em que as galáxias estão inseridas, utilizamos uma versão que atribuí as galáxias aos halos de [Yang et al. \(2007\)](#) seguindo o método apresentado em [Trevisan, Mamon e Stalder \(2017\)](#). Neste novo catálogo, são 458.045 galáxias que foram divididas em cerca de 118.172 grupos. Converteremos $M_{200,m}$ e definimos $M_{halo} = M_{100}$ (a massa dentro de uma esfera que é 100 vezes mais densa do que a densidade *crítica* do Universo),

assumindo o perfil de Navarro, Frenk e White (1996) e a relação de concentração de massa dada por Dutton e Macciò (2014).

Definimos que as galáxias pertencem ao grupo se a distância ao centro do aglomerado R/r_{vir} estiver dentro do intervalo $0 \leq R/r_{vir} < 3$.

2.2.3 Classificação em Centrais e Satélites

As galáxias Centrais são definidas como aquelas que estão a uma distância $R/r_{vir} = 0$ do centro do aglomerado, já as Satélites são as galáxias que estão no intervalo $0 < R/r_{vir} < 3$. Para as galáxias com $R/r_{vir} \geq 3$, dizemos que elas estão fora do aglomerado e portanto são consideradas de campo.

2.3 GALÁXIAS VIZINHAS

2.3.1 Critérios de Seleção das Vizinhas

Se o ambiente influencia as galáxias compactas, pode influenciar a sua vizinha mais próxima. Determinamos as galáxias mais próximas através de um programa escrito na linguagem R. Utilizando as constantes cosmológicas padrões citadas no Cap. 1, calculamos a distância do diâmetro angular em Mpc ($DA (Mpc)$) das galáxias compactas, e a distância angular em radianos ($Dist_{Ang} (rad)$) das compactas até as galáxias de um catálogo do SDSS contendo cerca de 704.871 galáxias no intervalo de *redshift* $0.01 < z < 0.2$. Encontramos assim a distância projetada utilizando

$$Dist_{proj} = DA \cdot Dist_{Ang} \quad . \quad (1)$$

Dessa maneira, conseguimos descobrir quais são as galáxias mais próximas. Seguindo os mesmos passos, determinamos também qual é a quarta galáxia mais próxima.

Na Fig. 9 mostramos a distribuição das distâncias à vizinha mais próxima e a quarta vizinha, para ambas as amostras.

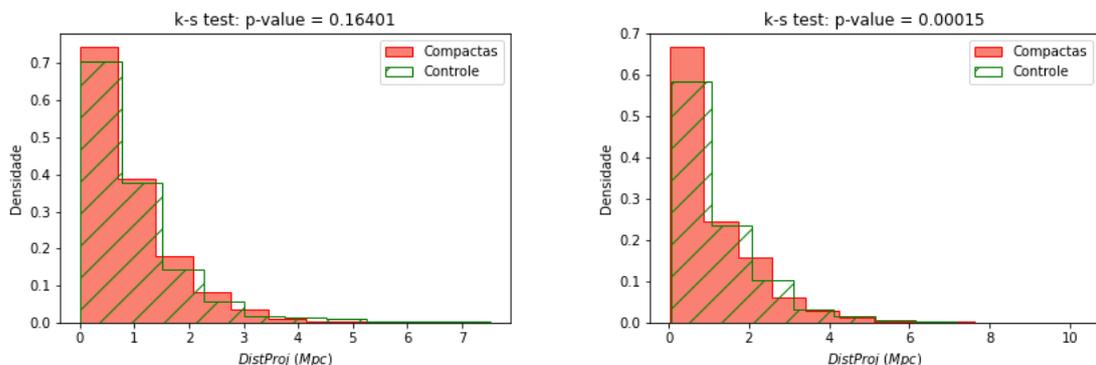


Figura 9 – A esquerda está a distância projetada para as vizinhas mais próximas e na direita as quartas vizinhas mais próximas.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS GALÁXIAS COMPACTAS QUIESCENTES

3.1.1 Classificação em Centrais e Satélites

A Fig. 10 nos mostra a distribuição de r_{vir} . Não há uma diferença significativa entre as duas distribuições de acordo com o Teste Kolmogorov-Smirnov, onde consideramos significativos aqueles com $p - value < 0,05$.

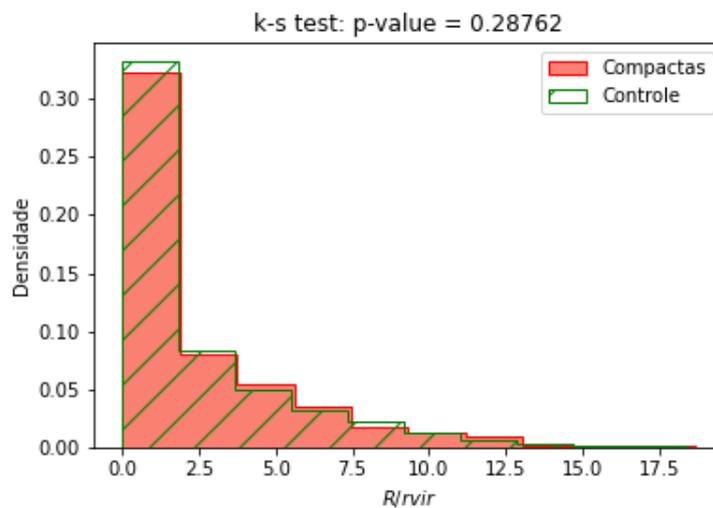


Figura 10 – Percebemos que não existe diferença significativa entre as duas distribuições, dessa maneira tanto as compactas quanto as de controle estão localizadas nos mesmos pontos.

A Fig. 11 nos mostra a comparação entre as distribuições da massa do halo de matéria escura habitado por galáxias compactas e controle. A diferença entre as duas amostras é bastante significativa. Percebemos que há um excesso de galáxias de controle em grupos de baixa massa, enquanto há um leve excesso de galáxias compactas em ambientes de alta densidade.

Dividimos as amostras das galáxias compactas e de controle em *bins* de massa do halo a fim de verificar se há diferenças entre compactas e controle na posição nas quais encontram-se dentro do aglomerado. O intervalo começa de $\log(M_{halo}/M_{\odot}) = 12,3$ e vai até $\log(M_{halo}/M_{\odot}) = 15,0$, dividindo em *bins* de largura $\Delta \log(M_{halo}/M_{\odot}) = 0,5$. Os resultados são mostrados na Tabela 1. Para cada *bin* de massa, dividimos as amostras em *bins* de R/r_{vir} . Com isso, descobrimos não apenas se a galáxia é central ou satélite, mas em qual intervalo específico de R/r_{vir} a galáxia está localizada. Para verificar se o número de centrais e satélites em cada amostra possui uma diferença significativa, aplicamos um teste de Fisher.

Conforme a massa do halo cresce, o número de galáxias centrais diminui. Não existe diferença significativa entre a amostra de compactas e de controle, portanto este aumento

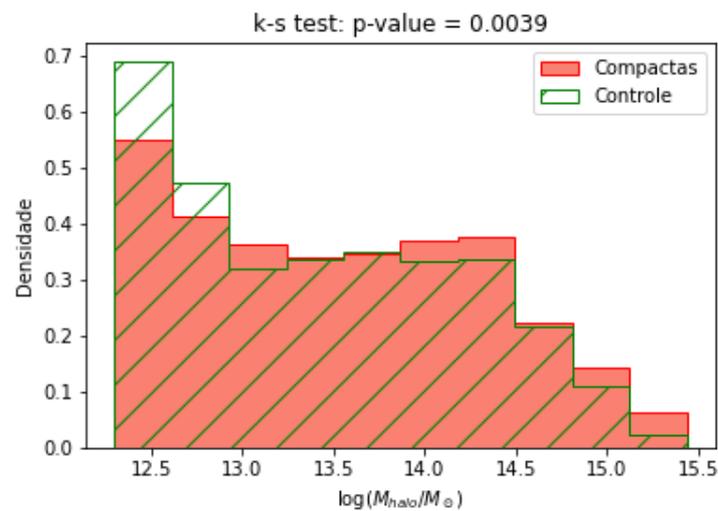


Figura 11 – Quando analisamos a distribuição de massa dos halos dos grupos percebemos que há um excesso de galáxias compactas em grupos mais massivos que os que as de controle habitam.

no número de galáxias satélites não está relacionado com a compacticidade. No entanto, percebemos que a diferença no número de galáxias habitando grupos de baixa massa é significativa, já as diferenças em aglomerados não.

As galáxias compactas quiescentes não apresentaram preferência por uma posição específica dentro do seu grupo. Desta maneira, nem a massa do halo e nem a compacticidade da galáxia estão relacionados com a distância da galáxia ao centro do halo.

3.1.2 Morfologia

A Fig. 12 nos mostra o histograma do parâmetro T -type para as amostras de compactas e de controle. A diferença entre as duas distribuições pelo teste K-S é bastante significativa. Este parâmetro é importante pois galáxias com T -type < 0 são *early-type* e com T -type > 0 são *late-type*. As galáxias compactas quiescentes possuem uma considerável fração de galáxias *early-type*, em comparação com a fração de *early-type* das galáxias de controle. Há um número significativo de galáxias *late-type* na amostra de controle, o que não é observado nas galáxias compactas.

Como T -type não permite separar adequadamente as galáxias elípticas de lenticulares, na Fig. 13 mostramos a distribuição do parâmetro $PS0$, que indica a probabilidade de uma dada galáxia com T -type ≤ 0 ser classificada como lenticular. Percebemos que as galáxias compactas são predominantemente lenticulares ($PS0 > 0,6$) enquanto as galáxias de controle são um misto, com maior porção de lenticulares e uma fração menor de elípticas.

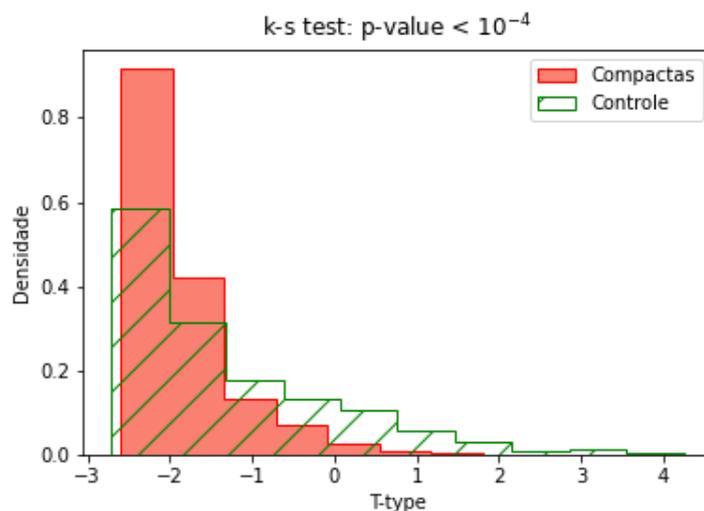


Figura 12 – Quando comparamos as distribuições de *T-type* das duas amostras, percebemos que a diferença é significativa. Há um número significativo de galáxias *late-type* na amostra de controle, já para as compactas há uma fração maior de *early-type* em sua população.

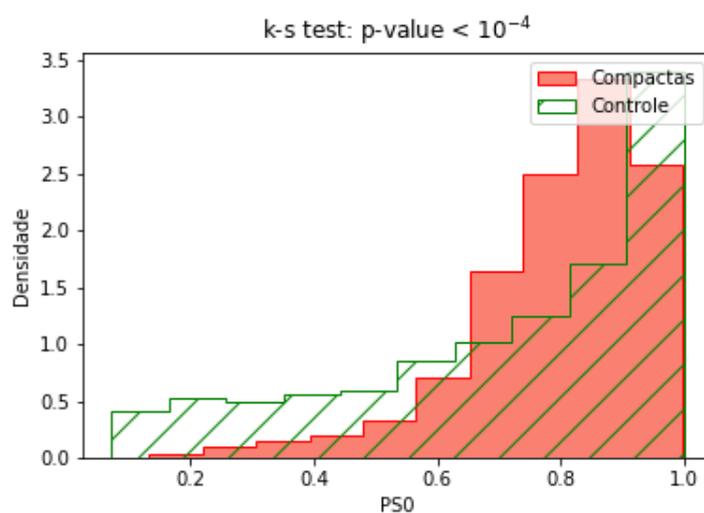


Figura 13 – A diferença entre as distribuições é significativa, assim podemos afirmar que há um excesso de galáxias lenticulares na amostra de compactas. Na amostra de controle parece haver um misto de galáxias tanto elípticas quanto lenticulares.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS GALÁXIAS VIZINHAS

Com o objetivo de verificar se o ambiente local possui alguma influência nas propriedades das galáxias, vamos comparar as principais propriedades das galáxias vizinhas às compactas e de controle. Por exemplo, caso encontremos uma diferença entre a idade ou metalicidade de compactas e controle devido ao ambiente local das galáxias compactas, esperamos que essa diferença seja refletida nas propriedades das vizinhas.

3.2.1 Massa

A distribuição de massa para as galáxias mais próximas das compactas e de controle são mostradas na Fig. 14. As vizinhas mais próximas não possuem diferença significativa em relação à sua massa quando comparadas com a distribuição das vizinhas das de controle. O mesmo vale para a distribuição de massa da quarta vizinha mais próxima, mostrada na Fig. 15. Igualmente as distribuições não possuem diferenças significativas.

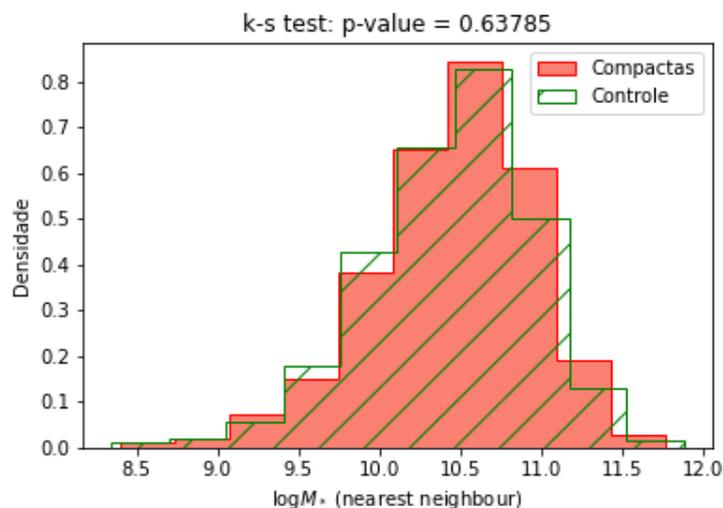


Figura 14 – A massa das galáxias vizinhas mais próxima não aparenta ter uma diferença significativa. Importante lembrar que a massa das galáxias vizinhas não está pareada.

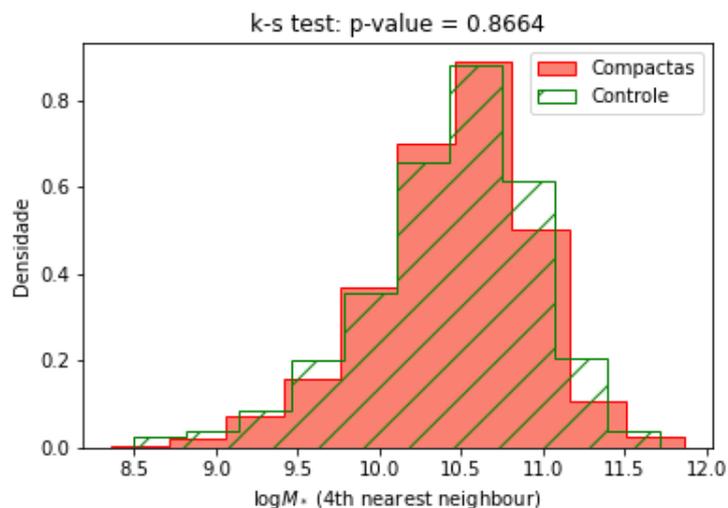


Figura 15 – Mesmo quando analisamos as quartas galáxias mais próximas, também não aparenta ter uma diferença significativa entre as distribuições. Novamente, a massa das galáxias vizinhas não está pareada.

3.2.2 Idade

Comparamos a idade das vizinhas das galáxias compactas com as vizinhas das galáxias de controle. Na Fig. 16 apresentamos as distribuições de idades para as duas amostras, pesada pela luminosidade ou pela massa. A diferença entre as amostras só é significativa quando comparamos a idade pesada pela luminosidade. Encontramos que as vizinhas das galáxias compactas são mais velhas que as vizinhas das de controle.

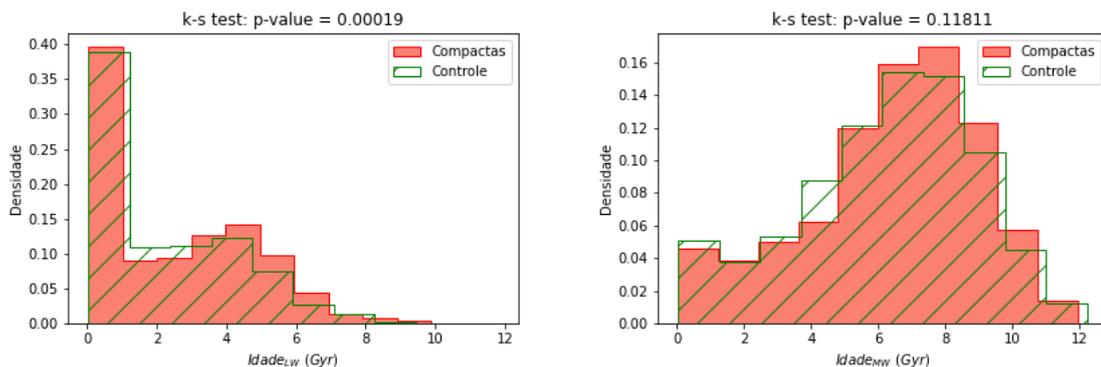


Figura 16 – A idade das vizinhas mais próxima só é significativa quando pesada pela luminosidade. Neste caso as galáxias compactas são mais velhas.

Comparamos as propriedades da quarta vizinha mais próxima a fim de verificar-se a existência de diferenças nas propriedades das galáxias a distâncias maiores. A Fig. 17 nos mostra a distribuição de idades medidas das duas formas para as quartas galáxias mais próximas das compactas e de controle. Quando a idade é pesada pela luminosidade, as quartas vizinhas mais próximas das galáxias compactas são mais jovens que as vizinhas das de controle. Já a diferença na idade pesada por massa não é significativa.

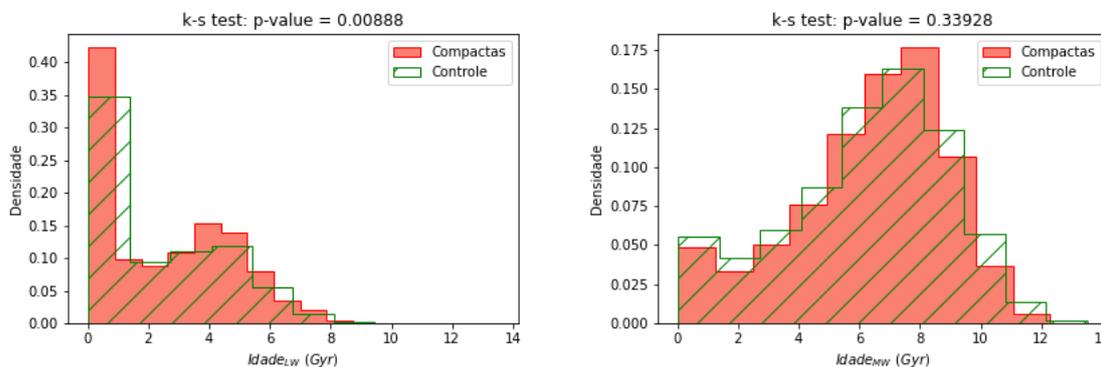


Figura 17 – As quartas galáxias mais próxima das compactas tendem a ter uma diferença significativa na idade pesada pela luminosidade.

As galáxias compactas possuem um ambiente próximo mais velho do que o ambiente das de controle, resultado já esperado pois galáxias em grupos mais massivos tendem a ser mais velhas, concordando com o resultado encontrado na Fig. 11. Quando estudamos galáxias

vizinhas mais distantes, encontramos uma situação ao contrário: as quartas galáxias mais próximas das compactas são mais jovens.

3.2.3 Metalicidade

A metalicidade foi estimada pesando pela luminosidade ou pela massa. A Fig. 18 nos mostra as distribuições de metalicidade para as vizinhas das compactas e de controle pesadas pela luminosidade e massa.

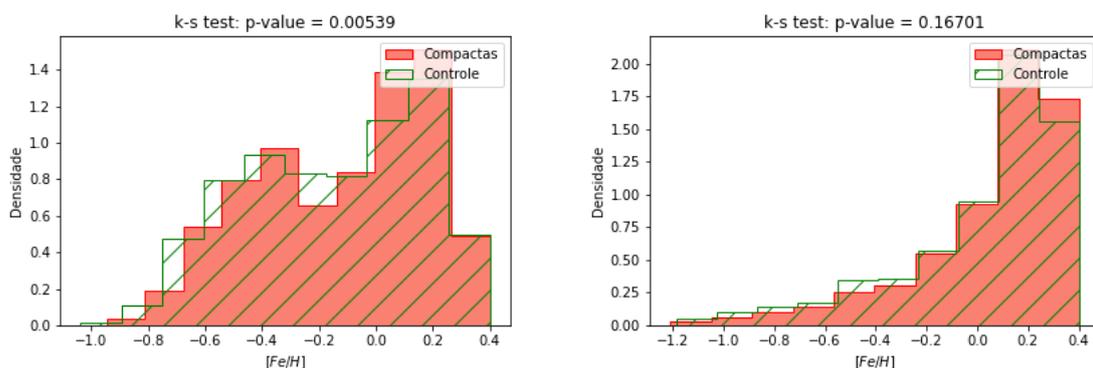


Figura 18 – Para as vizinhas mais próximas das galáxias compactas, tanto a metalicidade pesada pela luminosidade quanto pela massa possuem uma diferença significativa. As vizinhas das compactas tendem a ser mais ricas em metais do que as de controle.

Percebemos pela distribuição da metalicidade pesada pela luminosidade que as vizinhas mais próxima das compactas possuem uma metalicidade maior que as vizinhas das de controle. Essa observação é reforçada também quando são comparadas as distribuições de metalicidade pesadas pela massa.

Como na seção anterior, analisamos as distribuições das mesmas propriedades para a quarta vizinha mais próxima de cada amostra. Os resultados estão na Fig. 19. A mesma tendência ocorre. Mesmo nas quartas mais próximas, as vizinhas das compactas tendem a ser mais ricas em metais do que as de controle.

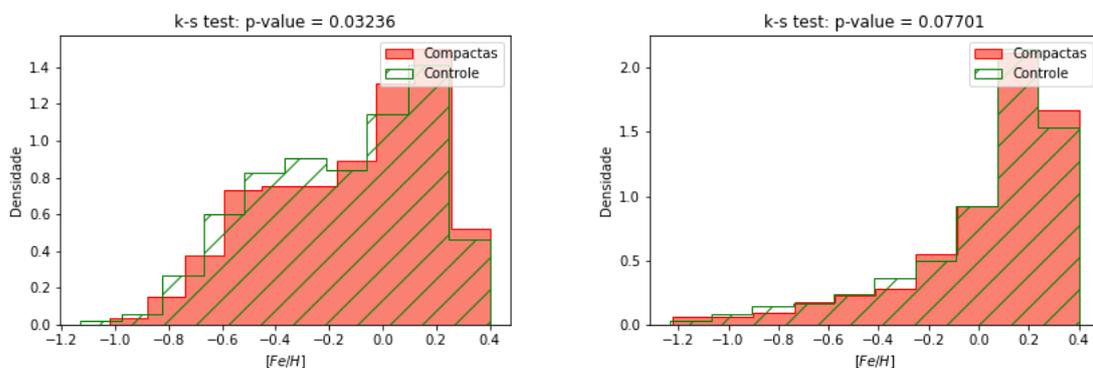


Figura 19 – Quando avaliamos as quartas galáxias mais próxima temos o mesmo resultado. A diferença é significativa tanto para o peso em luminosidade quanto em massa.

3.2.4 Morfologia

A distribuição do parâmetro T -type para as vizinhas mais próximas das compactas e de controle são mostradas na Fig. 20. As vizinhas das compactas possuem um excesso em T -type ≤ 0 , já as vizinhas das de controle são encontradas em uma fração maior a partir de T -type > 0 .

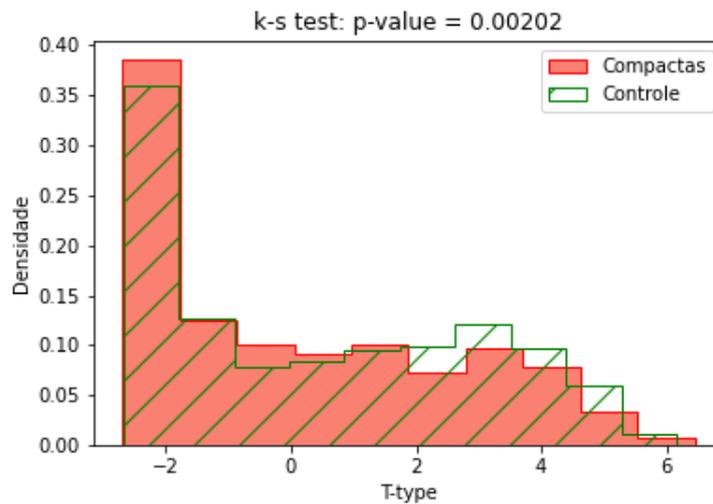


Figura 20 – O parâmetro T -type das vizinhas mais próxima é significativo. Em geral as vizinhas das compactas possuem um excesso em T -type ≤ 0 .

Verificamos também a distribuição do parâmetro $PS0$, que está apresentado na Fig. 21. Neste caso, a diferença não é significativa.

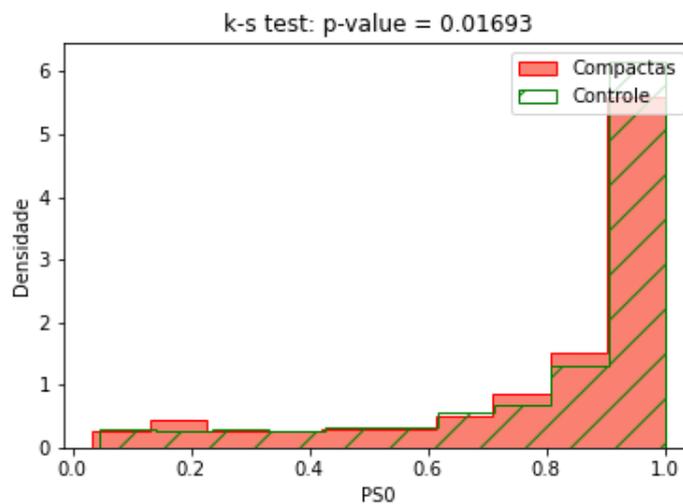


Figura 21 – Percebemos que a diferença não é significativa entre as duas distribuições.

A Fig. 22 mostra a distribuição de T -type para as quartas galáxias mais próximas das galáxias compactas e para as quartas mais próximas das galáxias de controle. A diferença entre as distribuições não é significativa.

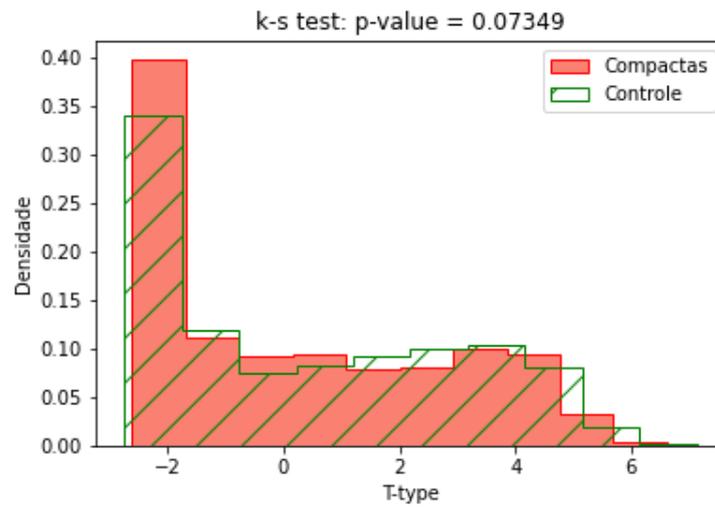


Figura 22 – Para as quartas vizinhas mais próxima não há diferença significativa entre as duas distribuições no parâmetro T -type.

Já na Fig. 23 mostramos as distribuições de $PS0$ para as quartas galáxias mais próximas. A diferença também não é significativa.

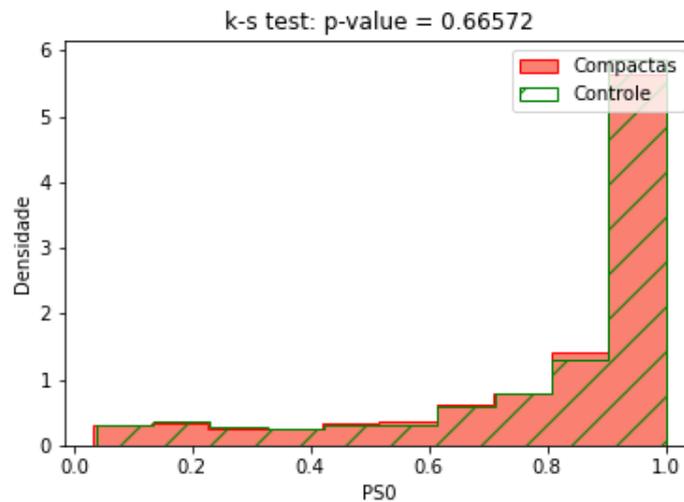


Figura 23 – Igualmente quando vamos analisar as distribuições da probabilidade das galáxias serem lenticulares para as quartas galáxias mais próxima não possui uma diferença significativa.

Amostra	Centrais	0 – 0,5 <i>rvir</i>	0,5 – 1 <i>rvir</i>	1 – 3 <i>rvir</i>	<i>Campo</i>	Total
12,3 a 12,5						
Compactas	51 (27,8%)	9 (4,9%)	13 (7,2%)	52 (28,4%)	58 (31,7%)	183
Controle	88 (37,9%)	19 (8,2%)	15 (6,5%)	53 (22,8%)	57 (24,6%)	232
p-value	0,036	0,238	Teste de Fisher 0,845		0,212	0,122
12,5 a 13,0						
Compactas	16 (4,8%)	60 (18,2%)	27 (8,2%)	94 (28,5%)	133 (40,3%)	330
Controle	29 (8,2%)	51 (14,5%)	35 (9,9%)	87 (24,6%)	151 (42,8%)	353
p-value	0,122	0,688	Teste de Fisher 0,509		0,194	0,757
13,0 a 13,5						
Compactas	1 (0,4%)	62 (23,6%)	29 (11%)	66 (25,1%)	105 (39,9%)	263
Controle	3 (1,2%)	57 (22,1%)	30 (11,6%)	77 (29,8%)	91 (35,3%)	258
p-value	0,369	0,754	Teste de Fisher 0,890		0,239	0,279
13,5 a 14,0						
Compactas	0 (0%)	94 (33,5%)	31 (11%)	67 (23,8%)	89 (31,7%)	281
Controle	0 (0%)	82 (30,7%)	33 (12,4%)	82 (30,7%)	70 (26,2%)	267
p-value	1,0	0,362	Teste de Fisher 0,134		0,127	0,111
14,0 a 14,5						
Compactas	0 (0%)	113 (39,8%)	53 (18,7%)	58 (20,4%)	60 (21,1%)	284
Controle	0 (0%)	71 (25%)	58 (20,4%)	63 (22,2%)	60 (21,2%)	252
p-value	1,0	0,005	Teste de Fisher 0,240		0,215	0,469
14,5 a 15,0						
Compactas	0 (0%)	58 (38,1%)	42 (27,6%)	34 (22,4%)	18 (11,8%)	152
Controle	0 (0%)	41 (31,3%)	36 (27,5%)	32 (24,4%)	22 (16,8%)	131
p-value	1,0	0,137	Teste de Fisher 0,792		1,0	0,028

Tabela 1 – Separamos a amostra das galáxias compactas e de controle em *bins* de massa ($\Delta \log M/M_* = 0,5$). Para cada *bin*, contamos o número de galáxias que são centrais e satélites, comparando a amostra das compactas com a de controle para verificarmos se existe alguma diferença que possa ser explicada pela massa. No caso das galáxias satélites, comparamos também o número de galáxias a diferentes distâncias do centro. Contabilizamos também as galáxias de Campo.

4 DISCUSSÃO

4.1 A LOCALIZAÇÃO DA GALÁXIA NO AGLOMERADO

Como vimos na Tabela 1, a diferença entre a quantidade de centrais e satélites entre as duas amostras não é significativa, assim as galáxias compactas não possuem uma preferência por uma determinada posição dentro do aglomerado para halos mais massivos.

Como as galáxias compactas não estão preferencialmente em locais mais densos dentro do aglomerado não conseguimos atribuir a sua sobrevivência e evolução em tamanho como algo oriundo de ambientes centrais dentro de aglomerados. Este resultado concorda com os obtidos por Tortora et al. (2020) que, utilizando o catálogo *Kilo Degree Survey* (KiDS), estudou o ambiente de galáxias massivas ultracompactas definidas por $R_e < 1,5 \text{ kpc}$ e $M_* > 8 \times 10^{10} M_\odot$. O estudo comparou a abundância em diferentes ambientes de galáxias massivas ultracompactas e galáxias quiescentes massivas não compactas e concluiu que ambas são encontradas em aglomerados e não possuem uma preferência específica por uma posição. Em comparação com este estudo, nossa amostra de galáxias é mais ampla pois o SDSS varre uma área maior do céu do que o KiDS e também cobre um intervalo de massa estelar maior.

Alguns estudos apontam o contrário do encontrado neste trabalho. Damjanov et al. (2015) utilizou o levantamento de *redshift* HectoSpec para encontrar galáxias vermelhas em $0,1 < z < 0,4$. ($r - i > 0,2$, $g - r > 0,8$, $r < 21,3$) no campo do *Cosmological Evolution Survey* (COSMOS) e medir a densidade de objetos em raios de 2 e 3 Mpc em torno das galáxias. A compacticidade das galáxias foi definida seguindo os critérios de Barro et al. (2013) e sua massa é $M_* \geq 10^{10} M_\odot$. Analisando as densidades, os autores concluíram que as galáxias compactas massivas preferem regiões de maior densidade quando comparado com a amostra completa de quiescentes. Peralta de Arriba et al. (2016) obteve resultados semelhantes. Os autores construíram uma amostra de galáxias compactas quiescentes massivas ($M_* > 10^{10} M_\odot$) utilizando o *New York University Value-Added Galaxy Catalogue* (NYU-VAGC) (Blanton et al., 2005). Os autores definiram como compactas galáxias que tivessem idades maiores que 10 Gyr e que ocupassem a parte de baixo do quinto percentil na distribuição de massa estelar-tamanho. Foi comparado as informações deste catálogo com dados obtidos através de uma simulação MI7 (Guo et al., 2013) que é baseada na versão original do *Millenium I* (Springel et al., 2005). A densidade de galáxias foi analisada dentro de um raio de 0,5 Mpc . Comparando essas duas densidades, os autores concluíram que as galáxias compactas estão preferencialmente localizadas no centro dos aglomerado e habitam regiões mais densas do que as outras galáxias massivas.

Há duas diferenças metodológicas entre os artigos citados e o presente trabalho, a primeira é o maior intervalo de massa coberto por esse estudo e a segunda é a construção de uma amostra de controle bem definida. Nossos critérios de seleção são mais amplos e

abrigam um número maior de galáxias, evitando então um possível viés de selecionar galáxias pela cor, selecionando então galáxias mais velhas e que habitam regiões densas não por serem compactas, mas porque galáxias mais velhas, independente de seu tamanho, tendem a habitar regiões mais densas. Além disso, há diferença na definição do ambiente. [Peralta de Arriba et al. \(2016\)](#) quantifica o ambiente de acordo com a densidade no entorno dos objetos, enquanto nós quantificamos o ambiente de acordo com a massa do halo de matéria escura que os objetos habitam e sua distância ao centro do halo.

Levando em conta os nossos resultados, há um deficit de galáxias compactas em grupos de baixa massa. Uma possível explicação é que fusões são mais comuns nesses grupos. Uma outra possibilidade é que as galáxias nestes ambientes tornaram-se quiescentes mais tarde, logo tendem a ter um tamanho maior. Para $\log(M_{\text{halo}}/M_{\odot}) > 12,5$, encontramos que as galáxias compactas habitam os mesmos ambientes que galáxias quiescentes não compactas de mesma massa.

4.2 PROPRIEDADES DAS VIZINHAS DAS GALÁXIAS COMPACTAS

O ambiente ao redor das galáxias compactas é caracterizado pelas propriedades de suas vizinhas mais próximas. Não existe diferença significativa na massa e na idade pesada pela massa. A diferença ocorre na idade pesada pela luminosidade. As vizinhas das galáxias compactas tendem a ser mais velhas do que as vizinhas da amostra de controle. Já quando analisamos a quarta galáxia mais próxima, percebemos que são as galáxias de controle que possuem vizinhas mais velhas. As galáxias compactas são mais velhas que as galáxias de controle, assim como sua vizinha mais próxima. Quanto a metalicidade, as vizinhas mais próximas são mais ricas em metais do que as vizinhas das galáxias de controle.

A morfologia das vizinhas das compactas e controle é diferente. As vizinhas das compactas em geral são *early-type*, enquanto há uma maior diversidade morfológica entre as vizinhas das de controle. Essa diferença de morfologia provavelmente está relacionada com a diferença na idade e na metalicidade. As galáxias *early-type* massivas tendem a ser mais velhas e ricas em metais do que as galáxias *late-type* de mesma massa. O ponto interessante nesta análise é que tanto as galáxias compactas são mais velhas que as de controle, quanto suas vizinhas mais próximas são mais velhas que as vizinhas das de controle. Isso levanta a hipótese de que o ambiente no entorno das compactas propiciou esses objetos a crescerem sua massa estelar e a atingirem a quiescência mais rapidamente. O mecanismo por trás desta evolução acelerada, porém, não está claro.

5 CONCLUSÃO

Analisando as amostras de compactas e de controle construídas através das relações de massa, tamanho e dispersões de velocidades, buscamos entender como o ambiente influencia na sobrevivência das galáxias compactas. Caracterizamos o ambiente destes objetos analisando a massa do halo que habitam, suas distâncias ao centro do halo, e as propriedades de suas vizinhas mais próximas, comparando os resultados aos de uma amostra de controle composta por galáxias quiescentes pareadas em massa e *redshift*. Definimos a distância ao centro do aglomerado como R/r_{vir} e a partir das definições de centrais e satélites contamos a frequência de cada tipo por *bin* de massa de halo e intervalo de distância ao centro do grupo.

Os principais resultados estão resumidos abaixo:

- As galáxias compactas não possuem uma preferência clara por uma determinada distância ao centro do halo que ocupam. Para grupo mais massivos que $\log(M_{halo}/M_{\odot}) > 12,5$, o fato dela ser compacta não é influenciado pela densidade do ambiente. As galáxias compactas habitam os mesmos ambientes que galáxias quiescentes não compactas de mesma massa.
- Como as vizinhas mais próximas das compactas são mais velhas e mais ricas em metais do que as vizinhas das de controle, podemos levantar a hipótese de que o entorno das compactas evoluiu mais rapidamente do que o entorno da amostra de controle. No entanto, não conseguimos dizer qual é o mecanismo por trás desse fenômeno.
- Há um deficit de compactas em grupos de baixa massa ($\log(M_{halo}/M_{\odot}) < 12,5$), o que indica que o ambiente pode impactar a sobrevivência ou a formação desses objetos neste caso.

5.1 PERSPECTIVAS

- Analisar o ambiente onde compactas encontram-se em diferentes *redshift*. Nesse trabalho, só temos informações sobre as galáxias que sobreviveram. No entanto devemos nos perguntar, o que ocorreu com àquelas que deixaram de ser compactas?
- Neste trabalho comparamos uma amostra de compactas com uma de controle com a mesma massa. Mas e se comparássemos com uma amostra de controle de galáxias com a mesma dispersão de velocidades? Como as compactas são mais velhas que as de controle, talvez isso introduza algum viés em nossa análise. Qual seria o resultado se compararmos com galáxias da mesma idade?

Referências

- Abazajian, K. N. et al. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. , v. 182, n. 2, p. 543–558, jun. 2009. Citado na página 4.
- Ahumada, R. et al. The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra. , v. 249, n. 1, p. 3, jul. 2020. Citado na página 4.
- Baldry, I. K. et al. Galaxy bimodality versus stellar mass and environment. , v. 373, n. 2, p. 469–483, dez. 2006. Citado na página 2.
- Baldry, I. K. et al. Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies. , v. 600, n. 2, p. 681–694, jan. 2004. Citado na página 1.
- Bamford, S. P. et al. Galaxy Zoo: the dependence of morphology and colour on environment*. , v. 393, n. 4, p. 1324–1352, mar. 2009. Citado na página 2.
- Barro, G. et al. CANDELS: The Progenitors of Compact Quiescent Galaxies at $z \sim 2$. , v. 765, n. 2, p. 104, mar. 2013. Citado na página 19.
- Blanton, M. R. et al. New York University Value-Added Galaxy Catalog: A Galaxy Catalog Based on New Public Surveys. , v. 129, n. 6, p. 2562–2578, jun. 2005. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 19.
- Bluck, A. F. L. et al. Bulge mass is king: the dominant role of the bulge in determining the fraction of passive galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , v. 441, n. 1, p. 599–629, jun. 2014. Citado na página 2.
- Buitrago, F. et al. Size Evolution of the Most Massive Galaxies at $1.7 < z < 3$ from GOODS NICMOS Survey Imaging. , v. 687, n. 2, p. L61, nov. 2008. Citado na página 2.
- Charbonnier, A. et al. The abundance of compact quiescent galaxies since $z \sim 0.6$. , v. 469, n. 4, p. 4523–4536, ago. 2017. Citado na página 2.
- Cid Fernandes, R. et al. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. , v. 358, n. 2, p. 363–378, abr. 2005. Citado na página 4.
- Damjanov, I. et al. Red Nuggets at $z \sim 1.5$: Compact Passive Galaxies and the Formation of the Kormendy Relation. , v. 695, n. 1, p. 101–115, abr. 2009. Citado na página 2.
- Damjanov, I. et al. The Environment of Massive Quiescent Compact Galaxies at $0.1 < z < 0.4$ in the COSMOS Field. , v. 815, n. 2, p. 104, dez. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 19.
- Domínguez Sánchez, H. et al. Improving galaxy morphologies for SDSS with Deep Learning. , v. 476, n. 3, p. 3661–3676, fev. 2018. Citado na página 4.
- Driver, S. P. et al. The Millennium Galaxy Catalogue: morphological classification and bimodality in the colour-concentration plane. , v. 368, n. 1, p. 414–434, maio 2006. Citado na página 2.
- Dutton, A. A.; Macciò, A. V. Cold dark matter haloes in the Planck era: evolution of structural parameters for Einasto and NFW profiles. , v. 441, n. 4, p. 3359–3374, jul. 2014. Citado na página 9.

- Graves, G. J.; Faber, S. M.; Schiavon, R. P. Dissecting the Red Sequence. II. Star Formation Histories of Early-Type Galaxies Throughout the Fundamental Plane. , v. 698, n. 2, p. 1590–1608, jun. 2009. Citado na página 6.
- Guo, Q. et al. Galaxy formation in WMAP1 and WMAP7 cosmologies. , v. 428, n. 2, p. 1351–1365, jan. 2013. Citado na página 19.
- HO, D. et al. Matchit: Nonparametric preprocessing for parametric causal inference. **Journal of Statistical Software**, v. 42, n. 8, p. 1–28, 2011. Disponível em: <<https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v042i08>>. Citado na página 6.
- Kauffmann, G. et al. The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 10^5 low-redshift galaxies. , v. 341, n. 1, p. 54–69, maio 2003. Citado na página 2.
- McLure, R. J. et al. The sizes, masses and specific star formation rates of massive galaxies at $1.3 < z < 1.5$: strong evidence in favour of evolution via minor mergers. , v. 428, n. 2, p. 1088–1106, jan. 2013. Citado na página 2.
- Navarro, J. F.; Frenk, C. S.; White, S. D. M. The Structure of Cold Dark Matter Halos. , v. 462, p. 563, maio 1996. Citado na página 9.
- Park, C. et al. Environmental Dependence of Properties of Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , v. 658, n. 2, p. 898–916, abr. 2007. Citado na página 3.
- Peralta de Arriba, L. et al. Massive relic galaxies prefer dense environments. , v. 461, n. 1, p. 156–163, set. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 3, 19 e 20.
- Poggianti, B. M. et al. Superdense Galaxies and the Mass-Size Relation at Low Redshift. , v. 762, n. 2, p. 77, jan. 2013. Citado na página 2.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2015. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Citado na página 6.
- ROSENBAUM, P. R.; RUBIN, D. B. The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. **Biometrika**, v. 70, n. 1, p. 41–55, 04 1983. ISSN 0006-3444. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/biomet/70.1.41>>. Citado na página 6.
- Salim, S. et al. GALEX-SDSS-WISE Legacy Catalog (GSWLC): Star Formation Rates, Stellar Masses, and Dust Attenuations of 700,000 Low-redshift Galaxies. , v. 227, n. 1, p. 2, nov. 2016. Citado na página 4.
- Salim, S. et al. UV Star Formation Rates in the Local Universe. , v. 173, n. 2, p. 267–292, dez. 2007. Citado na página 4.
- Schawinski, K. et al. The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies. , v. 440, n. 1, p. 889–907, maio 2014. Citado 2 vezes nas páginas e 2.
- Schnorr-Müller, A. et al. The puzzling origin of massive compact galaxies in MaNGA. , v. 507, n. 1, p. 300–317, out. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- Shen, S. et al. The size distribution of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , v. 343, n. 3, p. 978–994, ago. 2003. Citado na página 2.

- Simard, L. et al. A Catalog of Bulge+disk Decompositions and Updated Photometry for 1.12 Million Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , v. 196, n. 1, p. 11, set. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- Springel, V. et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. , v. 435, n. 7042, p. 629–636, jun. 2005. Citado na página 19.
- Strateva, I. et al. Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. , v. 122, n. 4, p. 1861–1874, out. 2001. Citado na página 1.
- Tortora, C. et al. Nature versus nurture: relic nature and environment of the most massive passive galaxies at $z < 0.5$. , v. 638, p. L11, jun. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 19.
- Trevisan, M.; Mamon, G. A.; Khosroshahi, H. G. Do the stellar populations of the brightest two group galaxies depend on the magnitude gap? , v. 464, n. 4, p. 4593–4610, fev. 2017. Citado na página 8.
- Trevisan, M.; Mamon, G. A.; Stalder, D. H. Group galaxy number density profiles far out: Is the 'one-halo' term NFW out to >10 virial radii? , v. 471, n. 1, p. L47–L51, out. 2017. Citado na página 8.
- Trevisan, M. et al. The properties and environment of very young galaxies in the local Universe. , v. 502, n. 4, p. 4815–4841, abr. 2021. Citado na página 7.
- Valentinuzzi, T. et al. Superdense Massive Galaxies in Wings Local Clusters. , v. 712, n. 1, p. 226–237, mar. 2010. Citado na página 3.
- van de Sande, J. et al. Stellar Kinematics of $z \sim 2$ Galaxies and the Inside-out Growth of Quiescent Galaxies. , v. 771, n. 2, p. 85, jul. 2013. Citado na página 2.
- van der Wel, A. et al. 3D-HST+CANDELS: The Evolution of the Galaxy Size-Mass Distribution since $z = 3$. , v. 788, n. 1, p. 28, jun. 2014. Citado na página 2.
- van Dokkum, P. G. et al. Confirmation of the Remarkable Compactness of Massive Quiescent Galaxies at $z \sim 2.3$: Early-Type Galaxies Did not Form in a Simple Monolithic Collapse. , v. 677, n. 1, p. L5, abr. 2008. Citado na página 2.
- Vazdekis, A. et al. Evolutionary stellar population synthesis with MILES - II. Scaled-solar and α -enhanced models. , v. 449, n. 2, p. 1177–1214, maio 2015. Citado na página 4.
- Yang, X. et al. Galaxy Groups in the SDSS DR4. I. The Catalog and Basic Properties. , v. 671, n. 1, p. 153–170, dez. 2007. Citado na página 8.