



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
MESTRADO ACADÊMICO EM FÍSICA

BÁRBARA CIBELE RIBEIRO DE VASCONCELOS

O PAPEL DO AMBIENTE NAS PROPRIEDADES DE ANÁLOGAS LOCAIS À
GALÁXIAS DE ALTO REDSHIFT

FORTALEZA

2023

BÁRBARA CIBELE RIBEIRO DE VASCONCELOS

O PAPEL DO AMBIENTE NAS PROPRIEDADES DE ANÁLOGAS LOCAIS À GALÁXIAS
DE ALTO REDSHIFT

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Física do Programa de Pós-Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Física. Área de Concentração: Física da Matéria Condensada.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas.

Coorientador: Prof. Dr. Luidhy Santana-Silva.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- V45p Vasconcelos, Bárbara Cibele Ribeiro de.
O papel do ambiente nas propriedades de análogas locais à galáxias de alto redshift / Bárbara Cibele Ribeiro de Vasconcelos. – 2023.
66 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Física, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas.
Coorientação: Prof. Dr. Luidhy Santana-Silva.
1. Astrofísica. 2. Astrofísica Extragaláctica. 3. Alto redshift. I. Título.

CDD 530

BÁRBARA CIBELE RIBEIRO DE VASCONCELOS

O PAPEL DO AMBIENTE NAS PROPRIEDADES DE ANÁLOGAS LOCAIS À GALÁXIAS
DE ALTO REDSHIFT

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Física do Programa de Pós-Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Física. Área de Concentração: Física da Matéria Condensada.

Aprovada em: 17/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Brito de Freitas (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luidhy Santana-Silva (Coorientador)
Universidade Cidade de São Paulo (UNICID)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por ter me materializado neste ponto do espaço no Universo, e por todo o seu apoio deste então.

Ao meu coorientador Luidhy Santana-Silva, por todas as orientações e por sua paciência que foram fundamentais não só para a realização deste trabalho mas também para a construção do meu conhecimento em astrofísica.

Ao meu orientador Daniel Brito de Freitas, por todas as orientações e oportunidades que me introduziram no contexto da astrofísica e me mantem determinada a continuar.

Aos integrantes do Stellar Team, em especial Brício, Cleber e Sarah, que sempre foram solícitos tanto academicamente quanto pessoalmente desde os primeiros momentos do time.

Ao meu amigo Rômulo, pelas incontáveis horas de jogos (muito competitivos) que proporcionaram momentos de descontração e alívio durante os desafios e incertezas que enfrentei ao longo dessa trajetória.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

"Touch the stars

Feel what we're made of" (WARPAINT, 2014)

RESUMO

A sequência principal de galáxias formadoras de estrelas é uma tendência crescente em um grupo observado de galáxias, resultante da relação entre a Taxa de Formação Estelar, do inglês Star Formation Rate (SFR) e as massas de cada objeto. No entanto, algumas galáxias se dispersam dessa sequência e a literatura atual aponta que, além da massa, o ambiente pode ser o fator determinante desse comportamento. Uma Lyman Break Analog (LBA) é uma galáxia com propriedades, como SFR e massa, semelhantes às de alto redshift, mas localizadas no Universo Local. Ao estudar a vizinhança de galáxias luminosas no ultravioleta, através dos dados do Sloan Digital Sky Survey (SDSS), podemos verificar se o ambiente desempenha um papel nas propriedades observadas dos objetos. A partir disso é possível investigar a densidade ambiental ao redor das LBAs para comparar suas propriedades com as de outras galáxias da região circundante com características semelhantes. Neste trabalho, para verificar o papel do meio nas propriedades das LBAs, utilizamos o método de vizinhos próximos para medir a densidade física em torno de cada galáxia da amostra selecionada.

Palavras-chave: astrofísica; astrofísica extragaláctica.

ABSTRACT

The main sequence of star-forming galaxies is a rising trend within an observed group of galaxies, resulting from the relationship between the Star Formation Rate (SFR) and the masses of each object. However, some galaxies deviate from this sequence, and the current literature indicates that, besides mass, the environment can be the determining factor for this behavior. Lyman Break Analogs (LBAs) are galaxies with properties, such as SFR and mass, similar to those at high redshifts but located in the Local Universe. By studying the neighborhood of bright galaxies in the ultraviolet through data from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), we can assess whether the environment plays a role in the observed properties of these objects. From this, it is possible to investigate the environmental density around LBAs to compare their properties with those of other galaxies in the surrounding region with similar characteristics. In this work, to verify the role of the environment in the properties of LBAs, we use the nearest neighbor method to measure the physical density around each galaxy in the selected sample.

Keywords: astrophysics; extragalactic astrophysics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo do colapso monolítico	15
Figura 2 – Cenário de formação hierárquico	17
Figura 3 – Diagrama de Hubble	18
Figura 4 – Triplete de Leão	19
Figura 5 – Aglomerado de galáxias SDSS J1004+4112	20
Figura 6 – Galáxia NGC821	21
Figura 7 – Modelo de uma galáxia submetida a ram-pressure stripping	22
Figura 8 – Galáxia espiral NGC4402 caindo no aglomerado de Virgem exibindo sinais de ram-pressure stripping	23
Figura 9 – Estágios de um merger de duas galáxias	24
Figura 10 – Histórico de SFR vs redshift	26
Figura 11 – Drop-out na seleção de galáxias formadores de estrelas em redshift $z \sim 3$	28
Figura 12 – Espectro de uma das LBAs da amostra selecionada	37
Figura 13 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra	38
Figura 14 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra	39
Figura 15 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra	40
Figura 16 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra	41
Figura 17 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra	42
Figura 18 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra	43
Figura 19 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra	44
Figura 20 – Algoritmo de agrupamento Friends of Friends	46
Figura 21 – Distribuição das distâncias comóveis	47
Figura 22 – O Aglomerado de Coma	48
Figura 23 – Distribuição das distâncias comóveis para o aglomerado de Coma	49
Figura 24 – Relação Morfologia-Densidade	50
Figura 25 – Relação entre a SFR e medidas de densidade para K10 para o Aglomerado de Coma	51
Figura 26 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k_4 e k_5 para o Aglomerado de Coma	51
Figura 27 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k_4 e k_{10} para o Aglomerado de Coma	52

Figura 28 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k5 e k10 para o Aglomerado de Coma	52
Figura 29 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k4 e k5	53
Figura 30 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k4 e k10	54
Figura 31 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k5 e k10	55
Figura 32 – Distribuição de medidas de densidade para o estimador k4	55
Figura 33 – Distribuição de medidas de densidade para o estimador k5	56
Figura 34 – Distribuição de medidas de densidade para o estimador k10	56
Figura 35 – Comparação entre os estimadores k4 e k10 e SFR	57
Figura 36 – Relação entre estimadores k4 e k10 e Taxa de Formação Estelar Específica, do inglês Specific Star Formation Rate (sSFR)	57
Figura 37 – Comparação entre os estimadores k4 e k10 e SFR	58
Figura 38 – Comparação da dependência ambiental da sSFR em função dos estimadores de densidade k4 e k10	59
Figura 39 – DELVE DR2	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das propriedades das UVLGs com as observadas em LBGs (HOOPES <i>et al.</i> , 2007)	30
Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas	31
Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas	32
Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas	33
Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas	34
Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas	35
Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CASJobs	Cross-Application Server Jobs
CDM	Matéria escura fria, do inglês Cold Dark Matter
DEC	Declinação
GALEX	Galaxy Evolution Explorer
ICM	Meio intra-aglomerado, do inglês Intracluster Medium
KNN	k-ésimo vizinho mais próximo, do inglês k-nearest neighbor
LBA	Lyman Break Analog
LBG	Lyman Break Galaxy
RA	Ascensão Reta, do inglês Right Ascension
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SFR	Taxa de Formação Estelar, do inglês Star Formation Rate
sSFR	Taxa de Formação Estelar Específica, do inglês Specific Star Formation Rate
UVLGs	Galáxias Luminosas Ultravioleta, do inglês Ultraviolet-Luminous Galaxies

LISTA DE SÍMBOLOS

z	Redshift
\odot	Sol
ε	Excentricidade
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Formação de Galáxias	14
1.2	Tipos de galáxias	16
1.3	Galáxias em diferentes ambientes	19
1.4	Universo em alto redshift	25
1.5	Lyman Break Galaxies (LBGs)	27
2	AMOSTRA E SELEÇÃO DE DADOS	29
2.1	Galáxias Análogas de Lyman-Break (LBAs)	29
2.2	Amostra	29
3	METODOLOGIA	45
3.1	Método Friends of Friends	45
3.2	Método do k-ésimo vizinho mais próximo	45
3.3	Teste para o Aglomerado de Coma	48
4	RESULTADOS	53
4.1	Resultados do teste de densidade	53
4.2	Resultados para comparação das massas	56
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Galáxias são sistemas compostos tipicamente por estrelas, gás, poeira e matéria escura ligados gravitacionalmente. A mais conhecida é a nossa própria galáxia, a Via Láctea, mas existem mais de 100 bilhões de galáxias no universo observável. Até o início do século 20 existiam dúvidas sobre a natureza das galáxias e seu posicionamento no universo, se estas estavam dentro ou fora da Via Láctea, e até então recebiam o nome de objetos nebulares. Em abril de 1920, Harlow Shapley e Heber D. Curtis realizaram um debate público sobre o tamanho da Via Láctea e a natureza das nebulosas. Shapley era a favor da ideia de que a Galáxia seria o Universo inteiro, e que as nebulosas espirais seriam meras nuvens de gás dentro da Via Láctea. Em contraste, Curtis argumentou que o universo era composto por diversas galáxias, e que as nebulosas espirais eram similares a Via Láctea (HETHERINGTON, 1970), porém o debate terminou inconclusivo até 1929 quando Edwin Hubble mostrou que as nebulosas se tratavam de outras galáxias, (HUBBLE, 1929), ao obter medidas de distâncias desses objetos muito maiores que o tamanho da Via Láctea, sendo esse o início da astrofísica extragaláctica.

1.1 Formação de Galáxias

Galáxias se formam a partir de pequenas flutuações de densidade que estavam presentes no Universo primordial e que cresceram sob a influência da gravidade. À medida que o Universo se expandia, a densidade média do gás cósmico teria diminuído. Nesse contexto, algumas regiões de aumento de densidade de tamanho suficiente para o colapso gravitacional, tornam-se mais pronunciadas. Esse processo é conhecido como instabilidade gravitacional e é responsável pela produção de regiões localizadas nas quais nuvens de gás colapsam formando as estruturas que darão origem às galáxias.

O colapso de uma região superdensa dando origem a uma única galáxia é o cenário mais simples para a formação. Nesse caso a massa galáxia formada é resultante principalmente da matéria escura, mas a região também contém matéria bariônica que se instala no centro do halo de matéria escura onde se forma a parte visível da galáxia, como mostrado na Figura 1, e a massa contida nessa região corresponde à massa da galáxia resultante. Esse cenário de formação é chamado modelo de colapso monolítico (EGGEN *et al.*, 1962).

Se considerarmos uma região superdensa que adquiriu momento angular de interações com o ambiente, o colapso nas partes centrais ocorreria muito rapidamente para formar

Figura 1 – Modelo do colapso monolítico

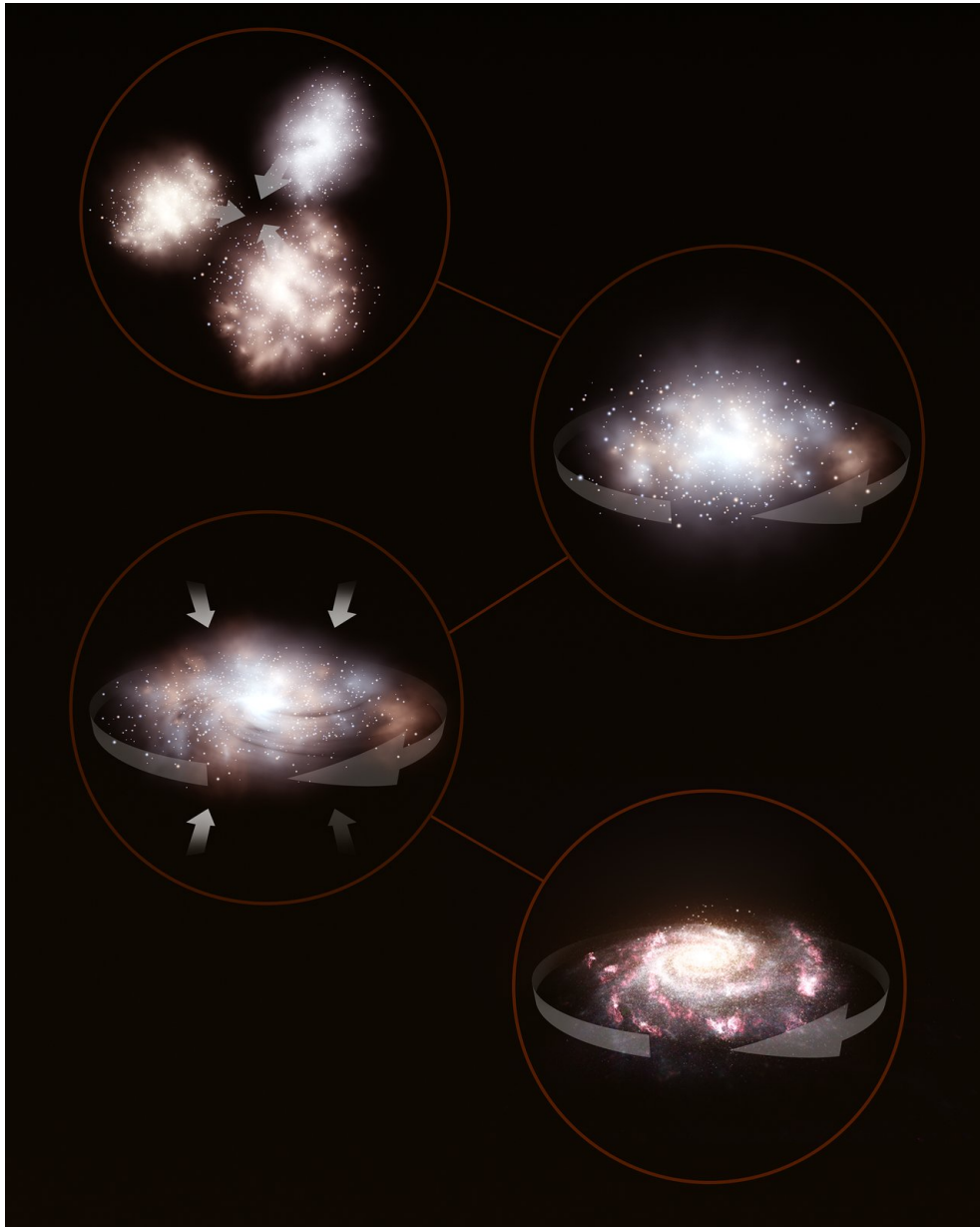


Ilustração artística representando o cenário de colapso monolítico, onde as galáxias são formadas por uma nuvem de gás em rotação que colapsa e caso o momento angular inicial da nuvem seja baixo, o gás remanescente se mantém na forma de um disco.

Fonte: (ESO, 2017)

uma distribuição esferoidal de estrelas que corresponderia ao halo da galáxia. Porém, nas partes externas da região em colapso, as órbitas das partículas das nuvens de gás se interceptariam no plano de rotação do sistema, e estas colisões dissipariam energia, resultando num disco de gás em rotação ao redor da região. Esse mecanismo é uma explicação plausível para a formação de uma galáxia espiral. As elípticas, dentro desse cenário formam em alguma época inicial através do colapso por dissipação de nuvens de gás e evoluem apenas passivamente desde então.

Simulações numéricas mostram que, para produzir um objeto elipsoidal, como uma galáxia elíptica, o gás deve esfriar rapidamente e estar relativamente livre de momento angular, caso contrário à medida que colapsa o gás entraria em rotação (LARSON, 1969).

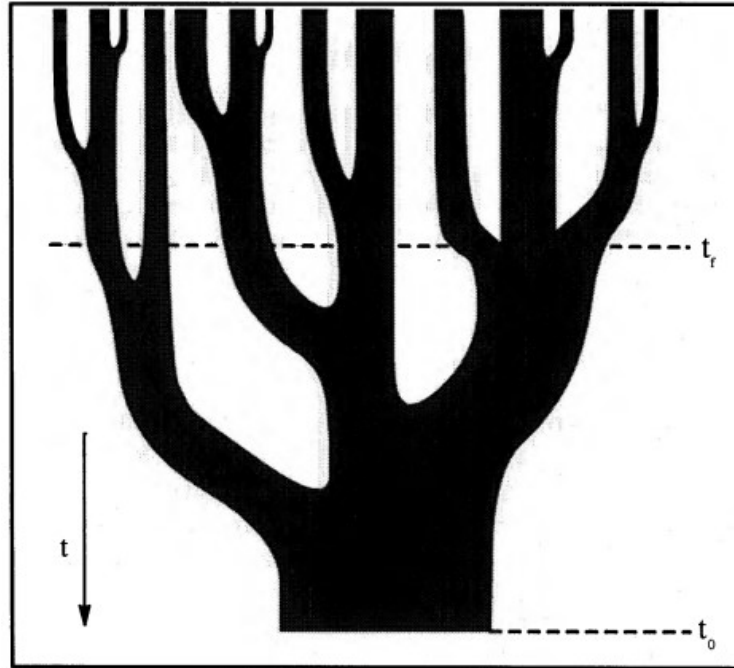
O colapso gravitacional depende da distribuição de massa, logo a forma de matéria dominante no universo deve desempenhar um papel fundamental nesse processo. Podemos considerar um comportamento dinâmico para a matéria escura, em que ela consiste em partículas massivas e de movimento lento. Esse tipo de matéria é denominado Matéria escura fria, do inglês Cold Dark Matter (CDM), e o termo "fria" refere-se ao fato de que as partículas hipotéticas de matéria escura possuem velocidades aleatórias que são pequenas quando comparadas à velocidade da luz. Simulações computacionais do progresso do colapso gravitacional em um universo dominado por CDM mostram que as primeiras estruturas a se formar têm massas de $10^6 M_{\odot}$, ordem inferior àquelas tipicamente encontradas para galáxias, normalmente $10^{11} M_{\odot}$ (JONES; LAMBOURNE, 2004). Com o tempo, estruturas de maior escala se desenvolvem pelo colapso adicional e pela fusão das estruturas de massa menor que foram formadas anteriormente. Ou seja, fragmentos protogalácticos formam-se no início da história do universo e muitas das galáxias que vemos são o resultado de fusões destes fragmentos. Esse processo é o cenário de formação hierárquico, representado visualmente na Figura 2, onde o tempo observado, t_0 , e o tempo de formação, t_f , estão marcados por linhas horizontais sendo o tempo de formação definido como o tempo em que um halo parental, contendo mais da metade da massa do halo final foi criado pela primeira vez (LACEY; COLE, 1993).

1.2 Tipos de galáxias

O diagrama de Hubble (HUBBLE, 1936), apresentado na Figura 3 é a base mais comum para a classificação morfológica de galáxias. Hubble categorizou visualmente as galáxias originalmente como uma sequência evolutiva da esquerda para a direita do diagrama, de early-types (elípticas, E, e do tipo S0) a late-types (espirais, S, e do tipo irregular, Irr). Essa interpretação evolutiva da morfologia das galáxias não é verdadeira na natureza, pois vários processos internos e externos modificam a evolução de uma galáxia independente de sua morfologia. Apesar disso os termos early-type e late-type ainda são usados para descrever os tipos de galáxias de maneira abrangente seguindo a classificação do diagrama de Hubble.

Galáxias elípticas são sistemas amorfos e suaves com uma distribuição de brilho que diminui de forma contínua, não apresentam sinais de um disco, são dominadas por estrelas mais

Figura 2 – Cenário de formação hierárquico



Esquema de formação de galáxias no modelo hierárquico. Nele, as estruturas de maior escala se desenvolvem pelo colapso e fusão de estruturas de menor massa com o passar do tempo observado t_0 e o tempo em que um halo que contém mais da metade da massa do halo final foi criado, t_f estão marcados pelas linhas horizontais.

Fonte: (LACEY; COLE, 1993)

antigas e têm relativamente pouca poeira, o que faz com que elas sejam muito semelhantes em diferentes comprimentos de onda. Elas são subdivididas de acordo com a sua elipticidade,

$$\varepsilon \equiv 1 - \frac{b}{a}, \quad (1.1)$$

onde a e b são respectivamente os semieixos maior e menor. As galáxias elípticas são encontradas numa grande variedade de excentricidades $0 \leq \varepsilon \lesssim 10$. A notação " En " é geralmente usada para classificar as galáxias elípticas em relação à sua excentricidade, com $n = 10\varepsilon$. Assim, uma galáxia $E4$ tem uma proporção de eixos $b/a = 0,6$, e as galáxias $E0$ têm isótopas circulares.

As galáxias $S0$ são uma transição entre galáxias elípticas e espirais, também chamadas de lenticulares devido à sua forma semelhante a uma lente. Elas possuem um bojo central e uma região envolvente de brilho relativamente sem estrutura, que frequentemente se assemelha a um disco sem braços espirais (SCHNEIDER, 2014).

Galáxias espirais são formadas por discos finos com estruturas de braços espirais e um bojo central. Elas são divididas em duas categorias, espirais barradas (SB) e espirais normais (S), de acordo com a presença ou ausência de uma barra na região central da galáxia. Em cada

Figura 3 – Diagrama de Hubble

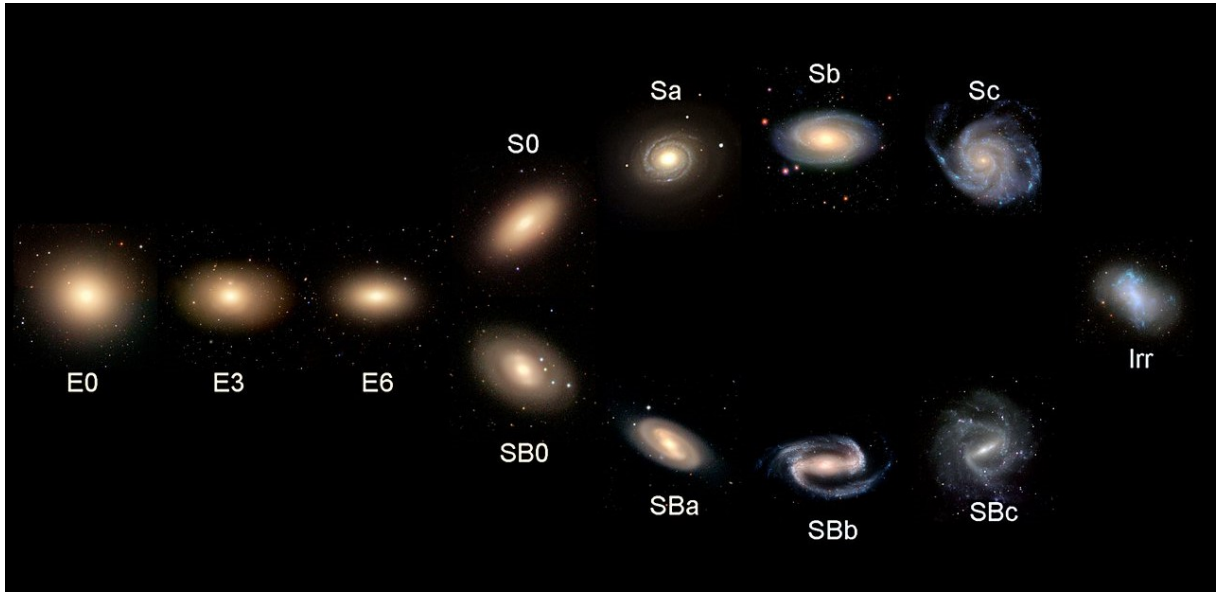


Diagrama de Hubble onde as galáxias estão classificadas de acordo com suas características visuais. À esquerda no diagrama estão as Elípticas (E), classificadas por graus de ecentricidade, seguidas pelas Espirais, classificadas pela presença de uma estrutura de barra S (espirais) e SB (espirais barradas) e pela razão do brilho entre o bojo e os seus braços espirais, e à esquerda no diagrama estão as Irregulares (Irr).

Fonte: (ZOONIVERSE, 2023)

uma das duas categorias as galáxias espirais são divididas em mais três classes, a, b e c, de acordo com a fração de luz do bojo central e do número de braços espirais e o entrelaçamento entre eles como visto no diagrama de Hubble da Figura 3.

As galáxias irregulares são aquelas que não encaixam perfeitamente em nenhuma das categorias anteriores. Elas não têm estrutura definida e contêm estrelas tanto antigas como jovens, quantidades significativas de gás e geralmente apresentam regiões brilhantes de formação estelar.

Além da classificação morfológica, as galáxias podem ser categorizadas de acordo com outras de suas propriedades medidas observacionalmente. Por exemplo, elas podem ser divididas em brilhantes e fracas de acordo com sua luminosidade, em azuis e vermelhas de acordo com a cor, em ricas e pobres em gás de acordo com o conteúdo de gás, em quiescentes ou starbursts de acordo com o nível atual de formação estelar, e em normais e ativas de acordo com a presença de um núcleo ativo (MO *et al.*, 2010).

1.3 Galáxias em diferentes ambientes

As galáxias não estão distribuídas de maneira uniforme no universo, e os mesmos fatores que causam a aglomeração da matéria em galáxias também causam a aglomeração das galáxias em grupos com dezenas de galáxias (Figura 4), e em grupos maiores, que são os chamados aglomerados de galáxias que podem conter milhões de objetos (Figura 5), os grupos são tipicamente dominados por galáxias espirais (SPINRAD, 2005). No entanto, galáxias também podem ser encontradas isoladas no universo (Figura 6).

Figura 4 – Tripleto de Leão



O tripleto de Leão é um exemplo de um grupo de galáxias, formado por três galáxias espirais: M66, M65 e a galáxia do Hamburgo, localizadas na constelação de Leão.

Fonte: (ESO, 2011)

A morfologia de galáxias é influenciada pela sua relação com o ambiente. Em aglomerados há uma dependência com a distância da galáxia ao centro do aglomerado e os tipos morfológicos encontrados de galáxias, a relação Morfologia-Densidade. Em ambientes mais densos, as frações de galáxias elípticas e S0 são maiores do que em ambientes de baixa densidade, em compensação há uma diminuição na fração de galáxias espirais e irregulares (DRESSLER, 1980).

Interações entre galáxias e o ambiente tem um papel importante na formação e

Figura 5 – Aglomerado de galáxias SDSS J1004+4112



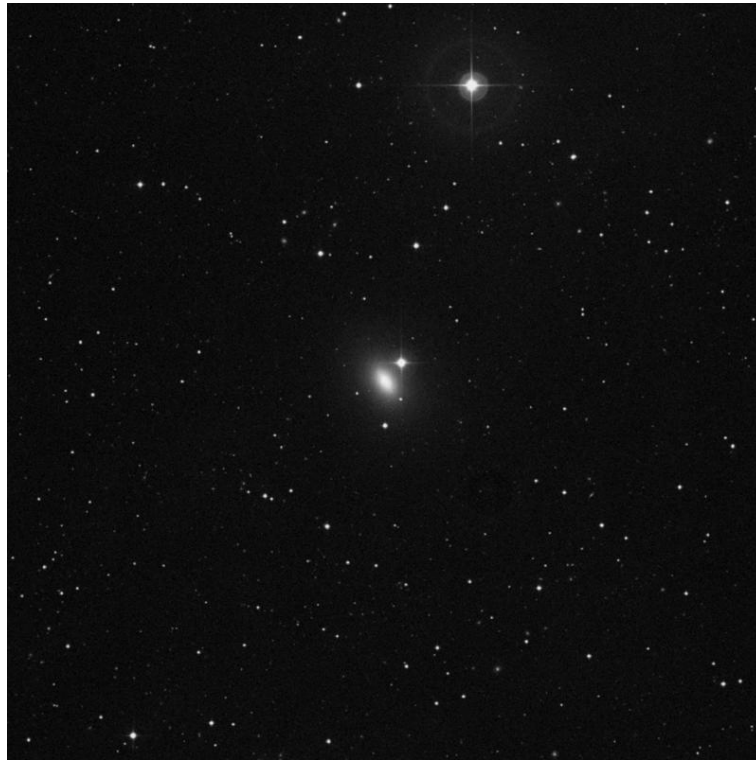
Imagem do aglomerado de galáxias chamado SDSS J1004+4112 que é tão massivo que sua gravidade curva a luz de galáxias que estão atrás dele. A luz de um quasar distante (o núcleo brilhante de uma galáxia ativa) foi curvada ao redor do aglomerado, aparecendo em cinco lugares na imagem.

Fonte: (SDSS, 2006)

evolução desses objetos. Por exemplo, a densidade do meio em que uma galáxia está localizada influencia sua taxa de formação estelar (DARVISH *et al.*, 2016) (GÓMEZ *et al.*, 2003), massa estelar (COCHRANE *et al.*, 2018) e a quantidade de gás (DARVISH *et al.*, 2018). Nos aglomerados, as galáxias experimentam os casos extremos dessas interações relacionados ao ambiente como estrangulamento, pressão de arraste (ram-pressure stripping) e os mergers (fusões).

A SFR de uma galáxia pode ser alimentada por um reservatório de gás que fica numa região externa ao halo de matéria escura. À medida que uma galáxia entra em um ambiente mais denso, esse reservatório pode se esgotar. Ao cair no ambiente do aglomerado pela primeira vez, o potencial gravitacional do ambiente cria efeitos de maré que permitem que o gás contido nas galáxias escape. Ao perder gás para o aglomerado, a quantidade necessária para produzir novas estrelas dentro da galáxia cai gradualmente e, eventualmente, a formação de estrelas cessa (LARSON *et al.*, 1980). A galáxia que passou por este processo sofreu um estrangulamento e teve sua produção de estrelas e teve sua produção de estrelas interrompida.

Figura 6 – Galáxia NGC821



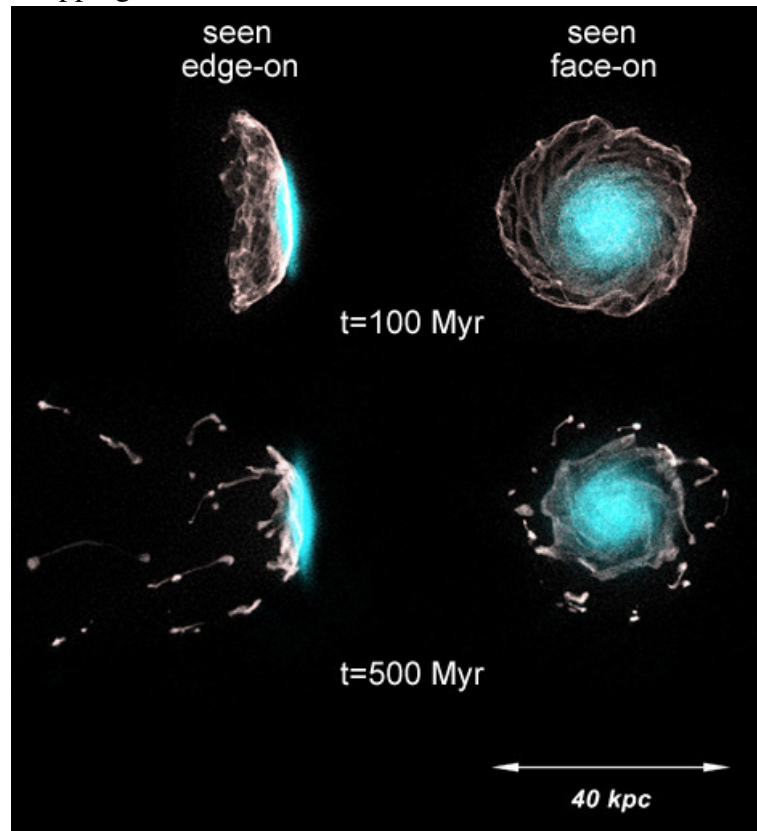
No centro da imagem está a galáxia elíptica NGC 821, que está isolada no espaço.

Fonte: (DSS2, 2006)

Aglomerados são permeados por gás quente emissor de raios-X, quando uma galáxia cai dentro deles e atravessa o Meio intra-aglomerado, do inglês Intracluster Medium (ICM) parte do gás contido nela é comprimido enquanto outra parte dele é removido, diminuindo sua formação estelar. Esse processo é um dos fatores que controlam a supressão da formação estelar em galáxias quando elas entram em aglomerados, potencialmente transformando galáxias espirais em galáxias lenticulares (S0) e é chamado de ram-pressure stripping, ou pressão de arraste (FERRERAS, 2019). Simulações numéricas indicam que a remoção de gás não ocorre instantaneamente, mas sim em uma escala de tempo comparável ao tempo que o som leva para percorrer a galáxia (MCCARTHY *et al.*, 2007). A Figura 7 mostra as previsões de um modelo para a distribuição de gás (em branco) e estrelas recém-formadas (azul) em uma galáxia sofrendo ram-pressure stripping enquanto se move de frente através do ICM (KRONBERGER *et al.*, 2008).

Evidências da pressão de arraste podem ser encontradas em vários aglomerados. Por exemplo, na Figura 8, a galáxia NGC 4402, que está caindo dentro do aglomerado de Virgem mostra vários indícios que está sendo afetada pela pressão de arraste. Na Figura 8 é visível que o disco de poeira e gás está curvado, o que indica dificuldade da galáxia em manter poeira contra a

Figura 7 – Modelo de uma galáxia submetida a ram-pressure stripping



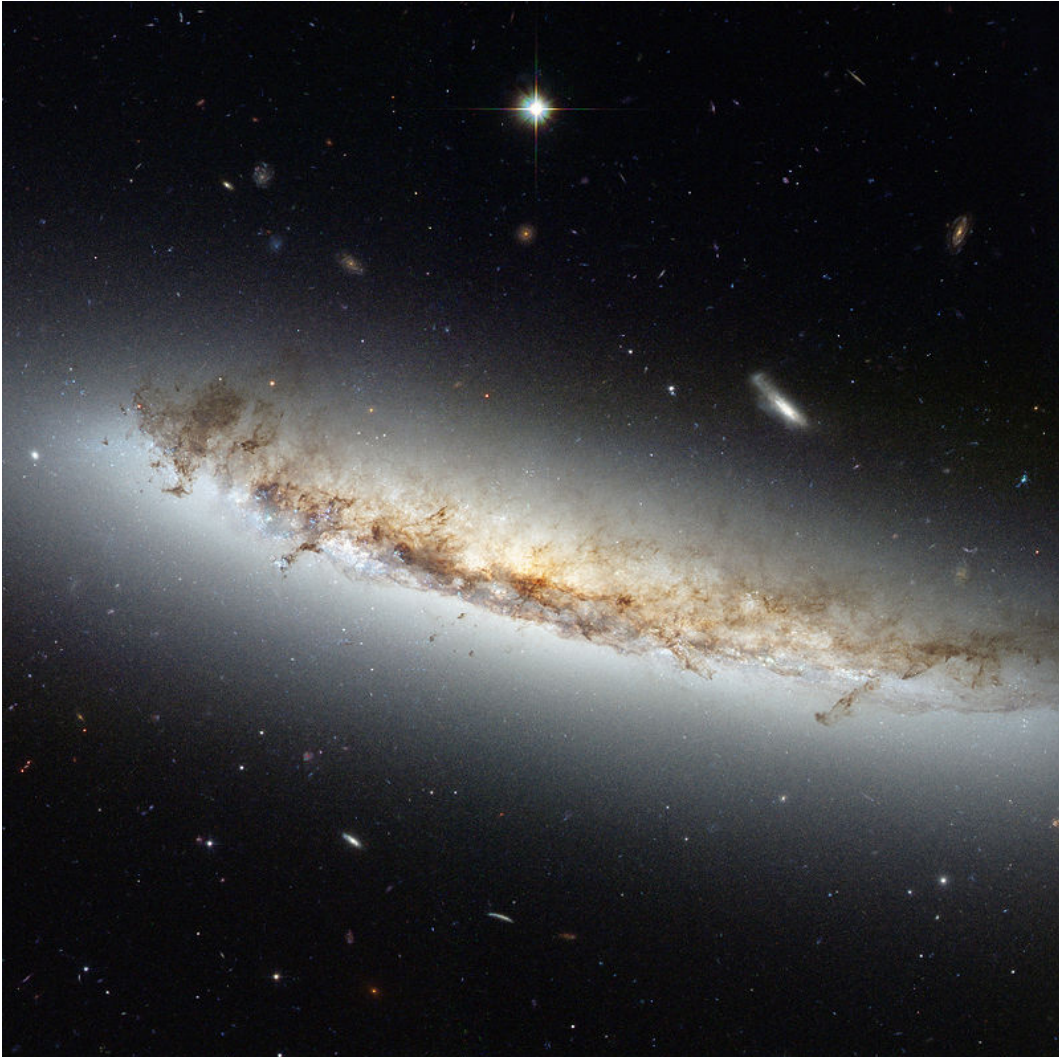
Distribuição de gás (em branco) e estrelas recém-formadas (em azul) para uma simulação de ram-pressure stripping envolvendo uma galáxia espiral que se move de frente através do ICM

Fonte: (KRONBERGER *et al.*, 2008)

pressão de arraste. Faixas de poeira e gás também podem ser vistas seguindo o movimento da galáxia, obscurecendo e avermelhando as estrelas posicionadas atrás (no topo da Figura 8). Ao mesmo tempo a pressão de arraste empurrou a poeira e o gás que geralmente são encontrados à frente do movimento da galáxia para dentro dela, revelando assim estrelas azuis brilhantes ao longo da borda dianteira da galáxia (parte inferior da Figura 8).

A interação entre duas galáxias e seus halos pode levar a uma fusão (merger), facilitada pela fricção dinâmica entre as duas estruturas envolvidas. O processo de merger é mais efetivo se as velocidades relativas das galáxias são comparáveis à dispersão de velocidades de seus componentes estelares (FERRERAS, 2019). Assim, é possível estabelecer que a formação de uma galáxia é dominada pela sua massa total, que é uma propriedade local, com uma combinação de processos relacionados ao ambiente. A Figura 9 mostra 6 momentos diferentes de galáxias em estágios de um merger: em (1) está o primeiro sinal de uma interação, uma ponte de matéria, que surge à medida em que os primeiros puxões de gravidade atraem poeira e gás das

Figura 8 – Galáxia espiral NGC4402 caindo no aglomerado de Virgem exibindo sinais de ram-pressure stripping



Fonte: (ESA, 2009)

galáxias que se aproximam, em (2) longas correntes de gás e poeiras se estendem e se curvam ao redor dos núcleos, em (3) essas correntes estão mais visíveis pois podem persistir por longos períodos de tempo após a ação principal ter terminado, em (4) com a aproximação dos núcleos das galáxias, suas nuvens de gás e poeira são agitadas e aceleradas dramaticamente resultando em ondas de choque se propagando pelas nuvens interestelares, em (5) gás e poeira são drenados para as regiões centrais ativas, alimentando explosões de formação estelar que se manifestam como aglomerados azuis que são característicos de estrelas jovens, por fim em (6) a galáxia resultante do merger exibe uma estrutura distorcida criando um aglomerado estelar azul.

Se uma galáxia pequena é incorporada a um sistema muito mais massivo, a matéria da galáxia pequena é simplesmente integrada à galáxia massiva, que não é muito afetada por essa fusão. Mergers de galáxias com massas comparáveis como na Figura 9 têm consequências mais

importantes e resultam em mudanças fundamentais nas propriedades da galáxia. Estas fusões são chamadas de “major mergers”. Mergers envolvendo galáxias ricas em gás geralmente são denominados de “wet mergers”, já fusões de galáxias elípticas, que não contêm gás interestelar frio são chamadas de “dry mergers” (APPENZELLER, 2016). Interações que não resultam em fusões mas que influenciam o estado interno das gláxias são chamadas de “perturbações”.

Figura 9 – Estágios de um merger de duas galáxias



6 imagens de galáxias em estágios diferentes de fusão. Leva centenas de milhões de anos para uma fusão ser concluída, então os estágios individuais são ilustrados com diferentes galáxias. No estágio 1, o primeiro sinal de uma interação será uma ponte de matéria, no 2 longos rastros de gás e poeira, conhecidos como caudas de maré, se estendem e voltam para envolver os núcleos, no 3 as caudas de maré são a assinatura de uma interação podem persistir muito depois que a ação principal termina, em 4 À medida que os núcleos das galáxias se aproximam, suas nuvens de gás e poeira são agitadas e aceleradas dramaticamente pela puxada conflituosa da matéria de todas as direções, no 5 gás e poeira são puxados para as regiões centrais, alimentando a glsSFR e por fim no estágio 6 as galáxias estão entrelaçadas como resultado do merger.

Fonte: (ESA, 2008)

1.4 Universo em alto redshift

Observar objetos astronômicos distantes sempre significa observar o passado do universo. Como o cosmos não é completamente homogêneo, existem pequenas variações locais da curvatura do espaço, porém, se a densidade cósmica for calculada em grandes escalas, as variações de densidade relativa tornam-se progressivamente menores com o aumento da escala. Assim, em grandes escalas, o universo parece homogêneo. Portanto, é possível definir um tempo cósmico médio, que é uma boa aproximação para todos os referenciais que estão localmente em repouso (APPENZELLER, 2016). A partir de uma variedade de observações astronômicas sabemos que o universo está em expansão (HUBBLE, 1929). Essa expansão cósmica significa que o comprimento de onda da luz aumenta quando viaja entre dois objetos que estão localmente em repouso. A razão entre o comprimento de onda da luz observada e o comprimento de onda da luz emitida é igual a mudança é então

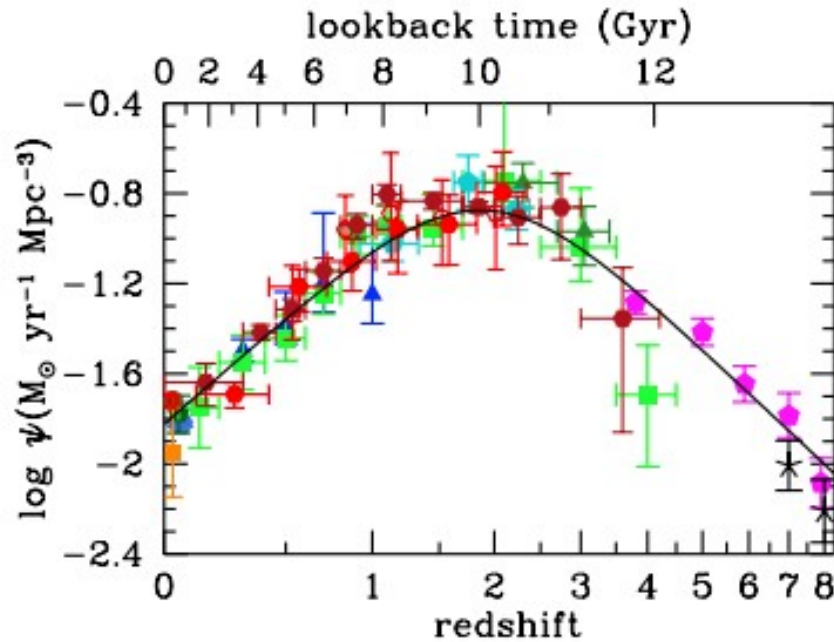
$$\frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} = \frac{a_{obs}}{a_{em}}, \quad (1.2)$$

onde λ_{obs} é o comprimento de onda observado, λ_{em} é o comprimento de onda emitido e $\frac{a_{obs}}{a_{em}}$ é a razão entre as escalas cósmicas quando a luz é observada e emitida. Essa mudança no comprimento de onda é chamada de redshift, usualmente representada por z

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = \frac{a_{obs}}{a_{em}} - 1. \quad (1.3)$$

A SFR é definida como a massa de estrelas que são formadas por unidade de tempo em uma galáxia, tipicamente dada em $M_{\odot}yr^{-1}$. Para a Via Láctea, temos uma SFR de $\sim 3M_{\odot}yr^{-1}$. Então podemos definir uma densidade de SFR para a massa de estrelas que são formadas por unidade de tempo e por unidade de volume expressa por $M_{\odot}yr^{-1}Mpc^{-3}$. Assim, SFR como função do redshift especifica quantas estrelas foram formadas em um determinado momento, funcionando como um histórico de formação estelar cósmico. O Universo teve sua maior taxa de formação estelar próxima de $z \sim 2$ (MADAU; DICKINSON, 2014), como mostrado no gráfico da Figura 10. Podemos concluir que a maioria das estrelas no Universo local formaram-se em altos redshifts, ou seja, o Universo inicialmente apresentou épocas de taxas de formação estelar consideravelmente mais altas que as atuais.

Figura 10 – Histórico de SFR vs redshift



Histórico de formação estelar cósmico. As cores vermelho e laranja representam dados no infravermelho. As cores rosa, verde, ciano e azul representam dados no ultravioleta distante.

Fonte: (MADAU; DICKINSON, 2014)

Enquanto a maior parte da formação estelar no Universo local acontece em galáxias espirais e irregulares numa taxa moderada, a formação estelar em altos redshifts foi dominada por surtos de formação estelar (starbursts) (SCHNEIDER, 2014).

Como galáxias em altos redshifts são mais jovens, uma comparação estatística das propriedades das galáxias em diferentes redshifts fornece uma visão de sua formação e evolução. Porém, uma galáxia de uma dada luminosidade e tamanho teria um brilho superficial muito baixo ao ser colocada em altos redshifts. Assim, se as galáxias em alto redshift fossem de luminosidades similares às galáxias atuais elas teriam brilhos superficiais muito baixos, fazendo com que sejam difíceis de detectar. (MO *et al.*, 2010)

Observar galáxias com alto redshift com resolução suficiente para revelar detalhes significativos da morfologia é importante para detectar evidências observáveis para a evolução das galáxias, ou seja, para realmente ver as diferenças morfológicas que provavelmente são atribuíveis à evolução. Estudos (BUTCHER; OEMLER A., 1978) já haviam encontrado fortes evidências para a evolução morfológica no número excessivo de galáxias azuis em aglomerados

de galáxias muito distantes ($z = 0,4$ a $0,5$). Esses autores sugeriram que as galáxias azuis são galáxias espirais e que, na época atual, essas são as galáxias que se tornaram as S0s que dominam aglomerados ricos e próximos, por exemplo o aglomerado de Coma.

1.5 Lyman Break Galaxies (LBGs)

Um fóton emitido com comprimento de onda menor que 912 \AA (limite de Lyman), é completamente absorvido pelo gás hidrogênio em uma galáxia. Assim, não haverá luz chegando até nós de uma galáxia com comprimentos de onda menores do que esse, e então vemos uma "quebra", a quebra de Lyman (em inglês Lyman Break), no espectro da galáxia. Para galáxias em alto redshift, essa quebra causa um desvio para o comprimento no óptico. Olhando para as cores das galáxias, devemos ver galáxias starforming em alto redshift como objetos que desaparecem nos filtros mais azuis, ou mais corretamente são vermelhos nas cores azuis (isto é, U-B) e azuis nas cores vermelhas (B-V ou V-I). Uma galáxia com esse tipo espectro é chamada de Lyman Break Galaxy (LBG) e é caracterizada por uma taxa de formação estelar relativamente alta $\sim 17M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ (CARILLI *et al.*, 2008).

Para uma LBG em $z \sim 3$, a quebra de Lyman cai entre as bandas U e B. Assim, selecionando as galáxias em uma pesquisa multicolorida profunda que não são detectadas (ou extremamente fracas) na banda U, mas detectadas nas bandas B e mais vermelhas, pode-se selecionar galáxias starforming candidatas na faixa de desvio para o vermelho $z = 2,5 - 3,5$. Essa técnica de seleção é chamada de drop-out.

A figura 11 ilustra, como o drop-out pode ser usado para selecionar galáxias formadoras de estrelas em redshifts $z \sim 3$. Na figura, o espectro de uma galáxia starforming típica tem uma quebra no limite de Lyman (912 \AA), que é desviado para o vermelho para um comprimento de onda $\lambda \sim 4000 \text{ \AA}$ se a galáxia estiver em $z \sim 3$. Como resultado, a galáxia aparece muito fraca (ou pode até ser indetectável) na banda U, mas brilhante nas bandas mais vermelhas (MO *et al.*, 2010).

Figura 11 – Drop-out na seleção de galáxias formadoras de estrelas em redshift $z \sim 3$

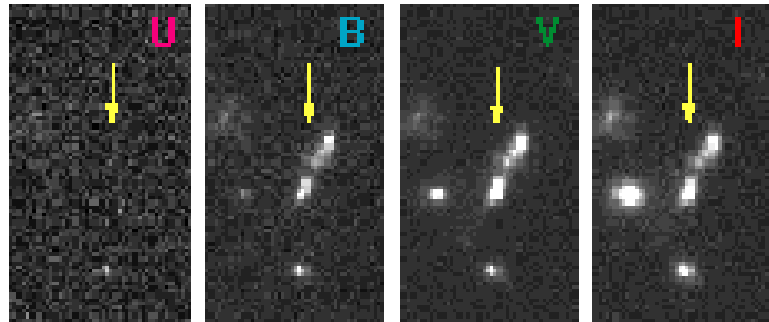
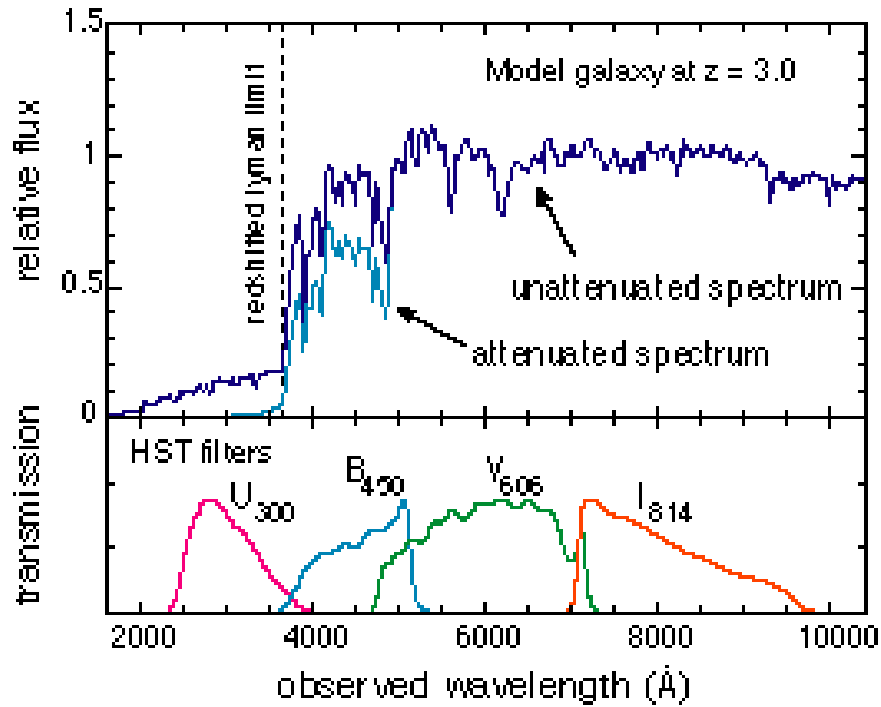


Ilustração da técnica de drop-out. O espectro de uma galáxia típica em formação tem uma quebra no limite de Lyman (912), que é deslocado para o vermelho para um comprimento de onda de $\lambda \sim 4000$ se a galáxia estiver em $z \sim 3$. A galáxia então aparece mais fraca, ou pode até mesmo não aparecer, na banda U e mais brilhante nas bandas mais avermelhadas.

Fonte: (ELLIS, 1998)

2 AMOSTRA E SELEÇÃO DE DADOS

2.1 Galáxias Análogas de Lyman-Break (LBAs)

LBAs são galáxias localizadas em baixo redshift ($z \sim 0.3$) que apresentam propriedades semelhantes as de galáxias starforming no universo distante (LBGs), por exemplo a luminosidade. As LBAs são uma subamostra de Galáxias Luminosas Ultravioleta, do inglês Ultraviolet-Luminous Galaxies (UVLGs) que foram identificadas comparando o levantamento Galaxy Evolution Explorer (GALEX) com o SDSS DR3 por (HECKMAN *et al.*, 2005) e (HOOPES *et al.*, 2007). Nesses trabalhos, 215 galáxias apresentam luminosidades $L_{FUV} > 10^{10}L_{\odot}$, que correspondem às luminosidades UV típicas de LBGs em $z \sim 3$ e àquelas com redshift inferior ($z = 1.5 - 2.5$) que também têm tipos espectrais semelhantes às LBGs.

As LBAs são caracterizadas por morfologias supercompactas com um maior brilho superficial ($I_{FUV} > 10^9 L_{\odot} kpc^{-2}$), e são galáxias raras no universo local por apresentar uma densidade espacial típica de $\sim 10^{-5} Mpc^{-3}$ (HECKMAN *et al.*, 2005). Assim, as LBAs representam uma amostra confiável para estudar os processos detalhados que ocorrem em galáxias no universo distante já que compartilham propriedades semelhantes estando em baixo z fazendo com que sofram pouca influência do efeito do escurecimento cósmico do brilho superficial (Cosmic Surface Brightness Dimming) (SANTANA-SILVA *et al.*, 2020).

2.2 Amostra

Para este trabalho 155 galáxias supercompactas foram selecionadas a partir dos critérios estabelecidos por (HOOPES *et al.*, 2007), apresentados na Tabela 1. Temos que as galáxias mais luminosas no ultravioleta ($L_{1530} > 2 \times 10^{10}L_{\odot}$) formam uma população diversa que abrange uma ampla gama de propriedades. A maioria dessas propriedades está relacionada com o brilho superficial (FUV) que reflete a taxa de formação estelar (HOOPES *et al.*, 2007). Então podemos dividir as UVLGs em grupos: grandes, compactas e supercompactas. O conjunto de UVLGs compactas com o brilho superficial mais alto ($I_{1530} > 10^9 L_{\odot} kpc^2$) que são as UVLGs supercompactas, possui características que são semelhantes às LBGs em redshifts mais altos. Assim, a partir desses critérios selecionamos as LBAs que são estudadas neste trabalho, sendo estas equivalentes ao grupo de LBGs.

Tendo as 155 LBAs, partimos da amostra de UVLGs e selecionamos as galáxias que

Tabela 1 – Comparação das propriedades das UVLGs com as observadas em LBGs (HOOPES *et al.*, 2007)

Parâmetro	Grandes	Compactas ($I_{1530} > 10^8 L_{\odot} kpc^{-2}$)	Supercompactas ($I_{1530} > 10^9 L_{\odot} kpc^{-2}$)	LBGs
$\log L_{1530}(L_{\odot})$	10.3 a 11.2	10.3 a 11.0	10.3 a 10.9	10.3 a 11.3
$\log I_{1530}(L_{\odot} kpc^{-2})$	6.0 a 8.0	8.0 a 10.3	9.0 a 10.3	9.0 a 10.0
$\log R_{50,u}$	0.9 a 1.6	-0.5 a 0.8	-0.5 a 0.4	0.0 a 0.5
$\log M_*(M_{\odot})$	10.3 a 11.7	9.2 a 11.0	9.0 a 10.7	9.5 a 11.0
$\log SFR(M_{\odot} yr^{-1})$	0 a 1.5	0.2 a 2.0	0.5 a 2.0	0.5 a 2.5

estão localizadas na área circundante. Para isso, utilizamos a ferramenta Cross-Application Server Jobs (CASJobs), onde podemos escrever consultas em SQL (queries) para obter informações específicas dos dados observacionais do SDSS.

Aplicando a query 1, obtivemos uma seleção de 585059 objetos e suas distâncias das UVLGs previamente selecionadas. Após removermos dados que continham erros experimentais (valores de redshift $z = 9999$), 315375 galáxias restaram das quais obtivemos as propriedades: redshift espectroscópico (query 2), massa, SFR (query 3) e magnitudes (u, g, r, i) (query 4).

Código-fonte 1 – Query 1 - Seleção de galáxias vizinhas

```

1 SELECT
2     m.RA, m.DEC, n.objid, n.distance
3 INTO mydb.neighbors_9
4 FROM MyDB.minhasgalaxias AS m
5 CROSS APPLY dbo.fGetNearbyObjEq(m.RA, m.DEC, 5) AS n;
```

Código-fonte 2 – Query 2 - Redshifts espectrofotométricos da amostra

```

1 SELECT
2     p.specObjID, p.ra, p.dec, p.z, p.zErr
3 INTO mydb.neighborsspecz
4 FROM SpecObjAll AS p, mydb.neighborsspecobjid AS m
5 WHERE p.specObjID = m.specObjID
```

Código-fonte 3 – Query 3 - Massa e SFR da amostra

```

1 SELECT
```

```

2     p.specObjID, p.ra, p.dec, p.logMass, p.SFR
3 INTO mydb.neighborssfr
4 FROM stellarMassStarformingPort AS p, mydb.
     neighborsspecobjid AS m
5 WHERE p.specObjID = m.specObjID;

```

Código-fonte 4 – Query 4 - Magnitudes das galáxias da amostra

```

1 SELECT
2     p.objid, p.ra, p.dec, p.u, p.g, p.r, p.i, p.z
3 INTO mydb.neighborsmags
4 FROM PhotoObjAll AS p, mydb.neighbors AS m
5 WHERE p.objid = m.objid;

```

Na Tabela 2 estão a Ascensão Reta, do inglês Right Ascension (RA) e Declinação (DEC), luminosidades e redshifts das 155 LBAs selecionadas da amostra a partir dos critérios de Hoopes e que estabelecemos um limite de $z = 0.2$.

Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas

objID	RA	DEC	z	$\log I_{1530}$ ($L_{\odot} \text{kpc}^{-2}$)	$\log R_{50,u}$ (kpc)
588015510345416756	5.25429	0.880023	0.098	10.68	-0.07
588015508738539596	13.8644	-0.363547	0.167	10.48	-0.12
587727180605292589	19.3712	-8.73437	0.166	10.77	0.33
587724197746180186	27.6183	13.1496	0.147	10.56	0.20
587727180610338988	30.9871	-8.13291	0.189	10.58	0.27
587724241226498139	41.3731	-8.27718	0.195	10.38	0.20
587731513155321989	47.7498	0.252568	0.164	10.32	0.11
587727180083298420	53.468	-6.10153	0.183	10.52	0.22
587738946658762820	121.581	19.8243	0.070	10.32	-0.18
587745540505796709	122.41	8.54928	0.162	10.47	0.31
587725981224599567	123.848	50.0708	0.165	10.44	0.25

Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas

objID	RA	DEC	z	$\log I_{1530}$ ($L_{\odot} \text{kpc}^{-2}$)	$\log R_{50,u}$ (kpc)
587725470667374755	124.762	47.7735	0.125	10.64	0.24
587732702851432522	127.076	4.29821	0.117	10.40	0.29
587741532767649834	127.997	17.3438	0.174	10.56	0.08
587739153358389348	130.79	24.0347	0.178	10.34	0.07
587731885739147310	131.079	41.7195	0.128	10.53	0.02
587735241712140403	132.007	31.9415	0.171	10.37	0.28
587741709940490256	135.403	19.3845	0.185	10.70	-0.18
587732771035938857	137.372	6.55441	0.181	10.45	0.26
587735240103690362	137.72	33.5022	0.116	10.39	-0.24
587728931881746520	139.652	50.9506	0.096	10.49	0.23
587742062127939739	139.688	16.7788	0.076	10.51	0.14
588297865254993981	140.36	38.772	0.144	10.36	-0.09
588013384341913605	141.502	44.46	0.181	10.70	-0.01
587728879261384780	142.371	2.94697	0.139	10.48	0.02
587741533848666254	144.258	24.4438	0.134	10.37	0.25
587741491436126234	144.433	24.6435	0.153	10.45	-0.17
588009365864120366	144.556	54.4736	0.102	10.56	0.07
588016891171831833	145.867	34.7863	0.178	10.44	0.26
588010359608573990	146.662	4.31376	0.066	10.35	-0.18
587726032234283030	147.337	1.71754	0.175	10.64	0.04
587735343190442016	147.479	9.54274	0.102	10.32	-0.22
587738946133753873	148.238	32.8279	0.179	10.40	0.30
587732049484513320	148.644	51.5856	0.129	10.69	0.17
587739157653946387	148.858	31.5849	0.198	10.49	-0.08
587728949047328863	149.52	0.174227	0.169	10.32	0.25
587726032772333652	150.096	2.22013	0.186	10.35	-0.29
587741816245846138	150.775	20.7989	0.133	10.37	0.17
587741532777545822	150.793	25.5052	0.200	10.55	0.06
588017605747802134	152.948	41.1656	0.152	10.65	0.31

Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas

objID	RA	DEC	z	$\log I_{1530}$ ($L_{\odot} \text{kpc}^{-2}$)	$\log R_{50,u}$ (kpc)
587745541056168007	153.227	15.6713	0.198	10.41	0.16
587739159266459679	153.262	34.271	0.176	10.55	0.16
588017627219361822	154.588	41.3201	0.153	10.56	0.02
587738947210772523	156.452	36.3829	0.127	10.42	-0.02
588016892786901096	157.289	39.7406	0.107	10.47	0.08
587728881415946300	158.527	5.51848	0.171	10.59	0.25
588017704531984517	158.705	11.9306	0.183	10.61	0.40
587738616485052432	159.621	34.4346	0.197	10.39	0.18
588017704533032995	161.132	12.157	0.149	10.83	0.37
588017627221852226	161.954	43.2282	0.184	10.30	0.05
587741708342919173	167.058	25.8989	0.114	10.67	0.01
588297863116554294	167.147	45.0527	0.175	10.55	-0.09
587729154132148291	167.923	63.4874	0.142	10.40	0.25
587731870704926817	168.184	55.0631	0.132	10.52	-0.11
587738617025200205	168.54	36.5398	0.161	10.53	0.25
587739646745575459	168.641	30.8832	0.182	10.35	0.02
587739405702660185	169.236	32.7693	0.176	10.33	-0.01
587729387149787195	170.253	59.276	0.147	10.56	-0.25
587739408388980778	174.342	35.4074	0.194	10.57	-0.26
587741708883722282	177.06	27.2239	0.134	10.64	0.23
587738615955193868	179.185	36.5565	0.199	10.58	0.19
587741601493155849	179.627	27.1239	0.183	10.34	-0.02
587741727650480172	180.031	26.0872	0.189	10.62	-0.04
588297865268297755	180.737	48.2006	0.195	10.40	0.17
587732769981005924	180.772	8.86979	0.182	10.47	-0.11
587739304752906333	182.175	35.6116	0.166	10.38	0.22
587726016681017431	183.369	3.73044	0.129	10.39	-0.05
588013384354496538	183.904	53.4124	0.195	10.64	0.28
587726013997187107	184.511	1.47201	0.184	10.51	0.17

Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas

objID	RA	DEC	z	$\log I_{1530}$ ($L_{\odot} \text{kpc}^{-2}$)	$\log R_{50,u}$ (kpc)
587735349111947338	184.767	15.4357	0.196	10.62	-0.01
587741722819887162	184.873	28.2622	0.131	10.44	0.20
587742012747022361	184.884	21.5569	0.141	10.43	-0.21
587732136997093487	185.579	53.682	0.121	10.34	0.20
588298662500171878	185.611	47.0667	0.187	10.34	-0.01
587741721209602073	185.722	26.8726	0.133	10.50	0.05
588017625619365895	187.641	44.3087	0.167	10.69	0.36
587742014358814769	187.779	22.8417	0.134	10.43	0.05
587739097528074272	189.873	37.1923	0.189	10.51	0.09
588017947206549608	191.055	41.4567	0.151	10.33	0.19
588017992294662200	191.288	10.7278	0.166	10.57	0.22
587742012749774868	191.638	21.4262	0.176	10.50	0.24
588848900991549442	191.664	0.725693	0.128	10.30	-0.23
587729157892014136	193.211	4.0824	0.169	10.42	0.12
588010879301845004	193.447	5.13684	0.110	10.36	0.11
587726015612190857	194.606	2.85248	0.194	10.52	0.23
587732136999518269	194.881	53.265	0.112	10.30	0.04
587732135389167725	195.378	51.9261	0.183	10.42	0.21
587741721213468749	195.667	26.5171	0.196	10.39	0.29
587739506084479041	195.693	32.4549	0.164	10.53	0.31
588011124115898428	196.19	62.4058	0.112	10.67	0.30
588298663577387086	197.352	47.1324	0.179	10.48	0.25
588013384358232110	198.047	52.717	0.183	10.36	0.25
587742062152253457	198.664	22.5232	0.179	10.62	-0.18
588017947746500700	200.353	40.8916	0.198	10.75	-0.14
588017604152393730	200.43	43.4059	0.195	10.72	0.39
587739405714259989	200.85	32.8788	0.179	10.63	-0.03
587742013290577967	201.265	21.1927	0.176	10.34	-0.17
587726031184330774	201.728	1.22968	0.180	10.53	0.14

Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas

objID	RA	DEC	z	$\log I_{1530}$ ($L_{\odot} kpc^{-2}$)	$\log R_{50,u}$ (kpc)
587742774031220880	202.47	16.3421	0.181	10.34	0.12
588017992299708424	202.866	10.2281	0.129	10.33	0.24
587726014005575781	203.785	1.44973	0.153	10.56	0.29
588017726019731501	204.851	7.65767	0.147	10.73	0.10
587738570859413642	204.868	15.2784	0.192	10.34	-0.18
588017725482860622	204.887	7.12488	0.129	10.35	0.15
587739707942567957	205.285	28.7784	0.168	10.63	0.23
587742578061738135	206.434	19.6087	0.193	10.37	0.15
587729772071616615	206.5	-3.40871	0.191	10.57	0.27
587742014903484434	206.934	21.7033	0.120	10.31	0.11
587742061619052556	207.601	21.1384	0.186	10.34	0.09
587725552827105291	208.483	66.8002	0.198	10.70	0.26
587739380983988235	208.891	32.5314	0.167	10.71	0.06
588007004181889045	209.318	62.2914	0.156	10.51	0.22
588017723874213964	209.34	5.75788	0.176	10.47	0.07
588017726559158298	210.72	7.67188	0.161	10.77	0.22
587742552287740027	211.181	19.216	0.191	10.45	-0.11
587722984438366312	211.875	0.969359	0.177	10.56	0.33
587736479199658069	212.865	12.0214	0.115	10.31	-0.05
587729158437994540	214.051	3.89489	0.115	10.39	0.19
587736807767474245	214.054	12.3946	0.123	10.78	-0.15
587739407866789898	214.582	31.9006	0.183	10.52	0.25
587736524299501667	214.914	5.99276	0.152	10.49	0.23
587742575381119045	214.956	16.3983	0.192	10.56	0.00
588017114517536797	216.024	42.2795	0.185	10.61	-0.22
587739132419899418	217.163	33.396	0.154	10.38	0.21
587742576455778316	217.235	16.8943	0.182	10.86	0.16
588017947215921165	217.862	36.6181	0.122	10.31	0.25
587742012761243735	219.252	17.9416	0.175	10.69	0.26

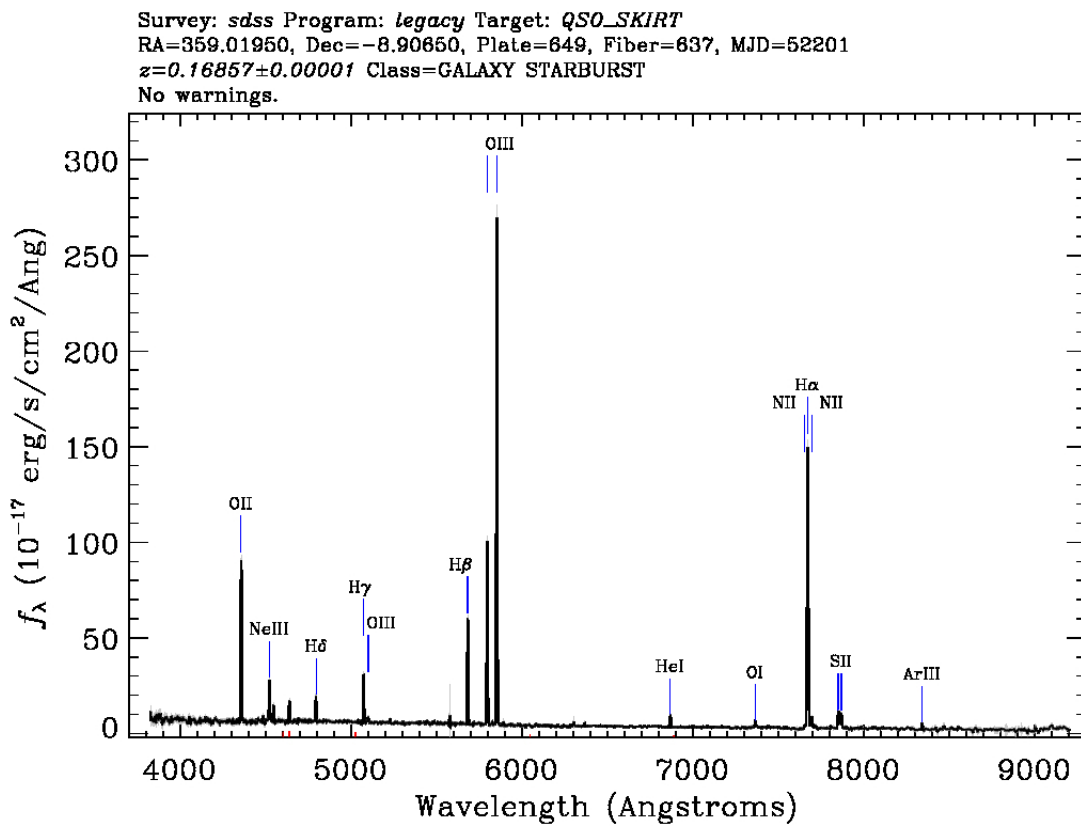
Tabela 2 – Propriedades das galáxias supercompactas selecionadas

objID	RA	DEC	z	$\log I_{1530}$ ($L_{\odot} \text{kpc}^{-2}$)	$\log R_{50,u}$ (kpc)
587736542021091412	221.731	7.75607	0.142	10.37	0.01
587735695916662813	222.074	51.0052	0.136	10.41	0.08
588848899394764890	223.331	-0.628558	0.186	10.67	0.26
587742629062967337	225.359	14.0767	0.181	10.57	0.39
587742611342622745	226.488	13.5753	0.180	10.68	-0.04
587729227147968579	226.87	59.987	0.182	10.49	0.17
587733429236006987	228.379	52.2466	0.194	10.32	0.16
587736478133256214	229.62	9.14595	0.142	10.37	-0.02
588017605773230095	229.643	36.2727	0.150	10.33	-0.08
588017702415433750	230.423	7.98938	0.094	10.38	-0.32
587736542024957984	230.496	6.68065	0.183	10.64	0.11
587736477060300965	231.341	7.95564	0.076	10.32	-0.24
588011102641127515	232.596	52.7461	0.076	10.37	-0.13
587733410454175848	236.385	40.9676	0.193	10.61	0.10
587736976348741725	237.479	25.1231	0.167	10.49	0.07
587736585511043200	238.64	28.6867	0.190	10.78	-0.10
587736898499510427	239.097	30.0787	0.121	10.58	0.32
587736942529085510	240.537	26.3293	0.072	10.52	0.00
587736813675937883	245.895	7.96889	0.157	10.37	0.19
587729232515170407	248.689	46.9842	0.194	10.64	0.13
587735666930155641	248.803	35.738	0.187	10.42	-0.16
587736585516810478	250.51	21.0627	0.117	10.54	0.25
587729409152254077	250.648	42.3972	0.151	10.43	0.28
587734303807373344	340.855	-0.768988	0.183	10.65	0.06
587731185122607218	342.786	-0.895434	0.162	10.47	0.15
587727221406236852	342.918	13.4537	0.062	10.35	0.19
587727225152733191	358.706	-10.9784	0.121	10.34	0.26
587727180596510880	359.02	-8.9065	0.169	10.36	0.19

As LBAs exibem linhas de emissão intensas em seus espectros, como o da Figura 12, que é uma característica típica de galáxias que possuem populações estelares jovens e altas atividades de formação estelar.

Limitar a amostra de LBAs estudadas em $z \sim 0.2$ permite que objetos menos brilhantes que porventura habitam regiões em torno de LBAs sejam também observados. Assim, temos uma estimativa mais completa da quantidade objetos que dividem o mesmo ambiente com as LBAs selecionadas.

Figura 12 – Espectro de uma das LBAs da amostra selecionada

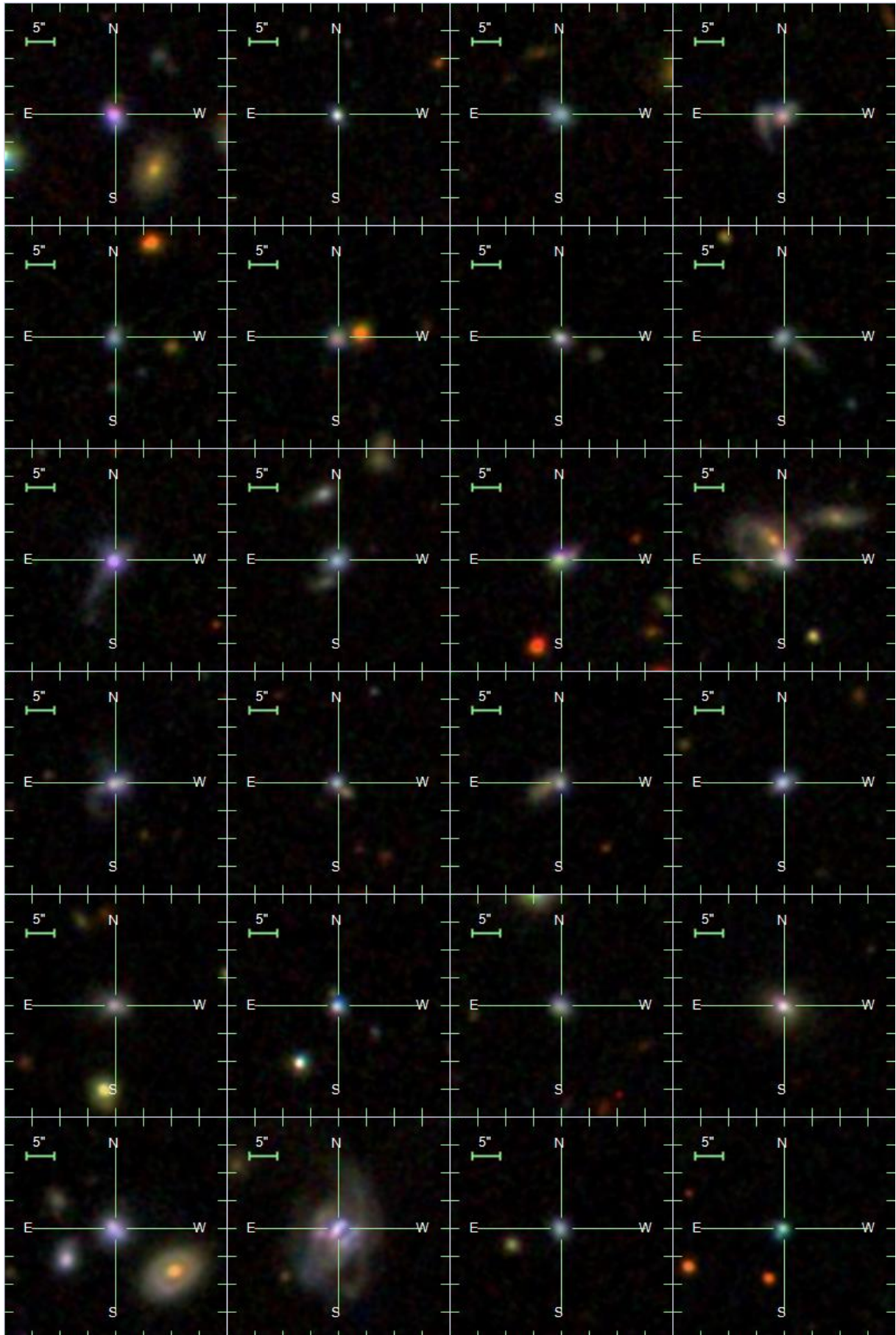


Espectro de uma das LBAs selecionadas. Um espectro típico de uma galáxia com alta formação estelar, visto que exibe linhas de emissão intensas.

Fonte: DR16 SDSS

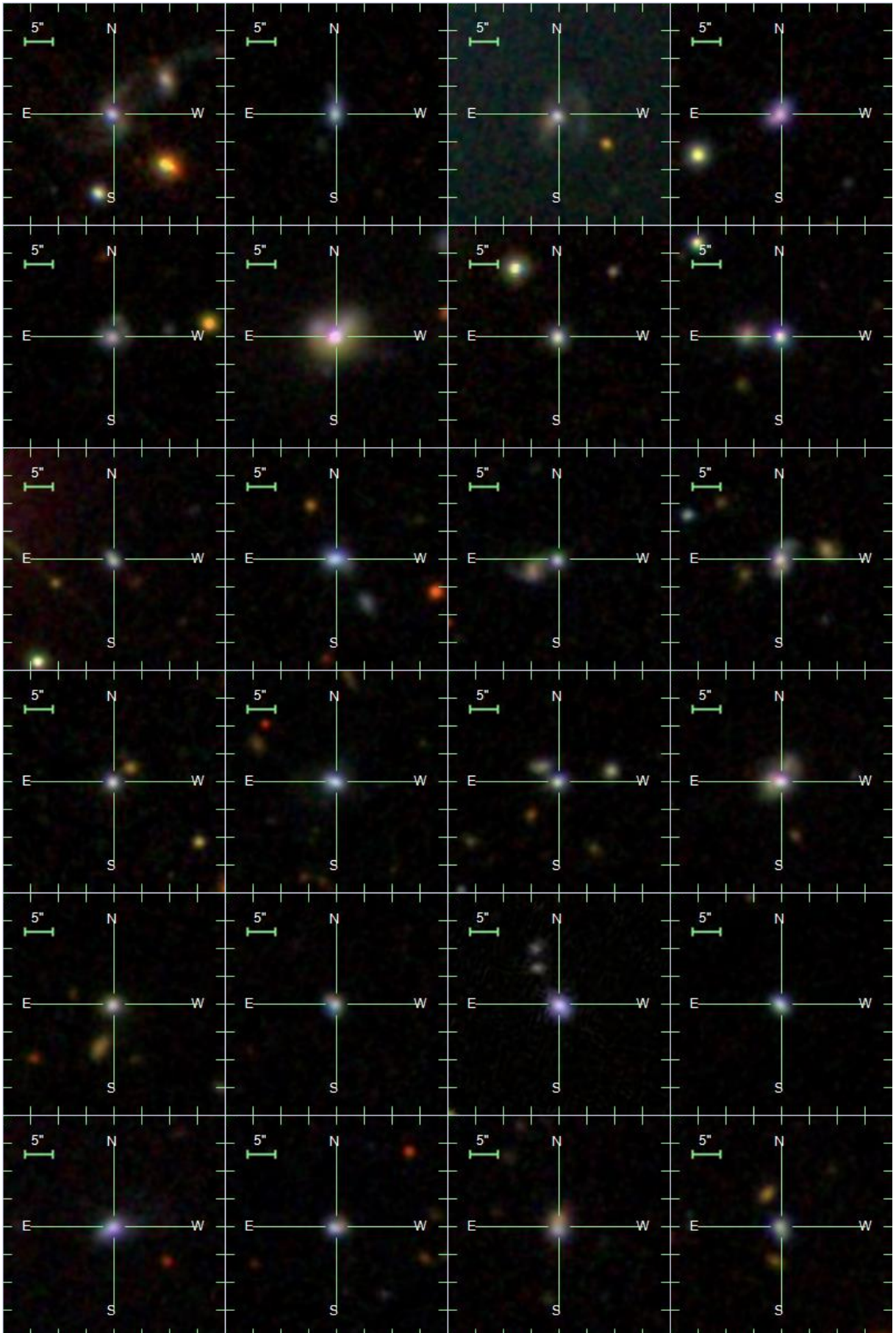
As Figuras 13 a 19 apresentam as imagens coloridas obtidas pela combinação de bandas g, r e i observadas pelo telescópio, retiradas do DR16 e DR7 do SDSS. Essas imagens estão disponíveis no SkyServer do SDSS e podem ser encontradas através de uma busca simples da RA e DEC das galáxias escolhidas utilizando a ferramenta quicklook no seguinte *link*: <https://skyserver.sdss.org/dr16/en/tools/quicklook/summary.aspx>

Figura 13 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra



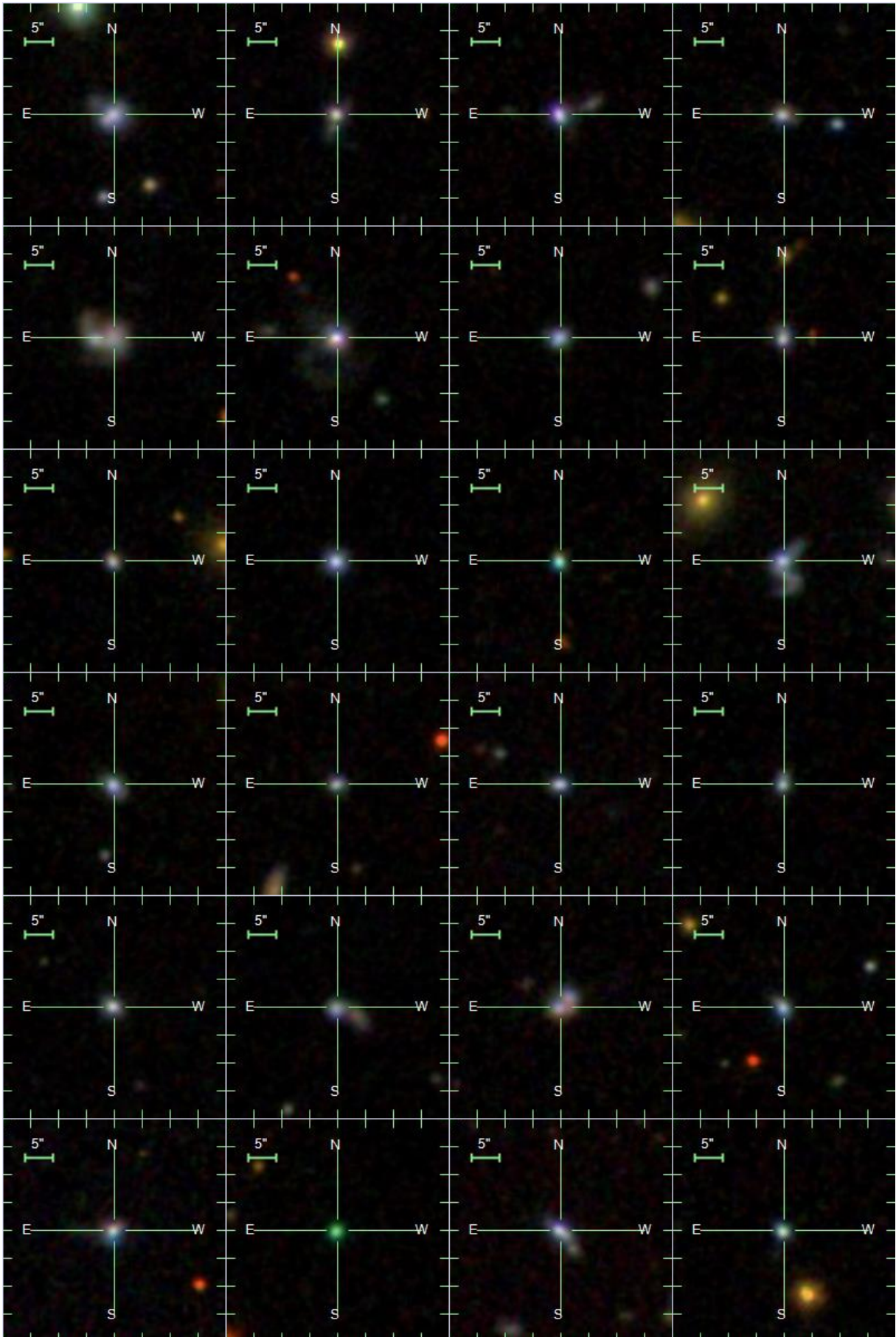
Fonte: DR16 SDSS

Figura 14 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra



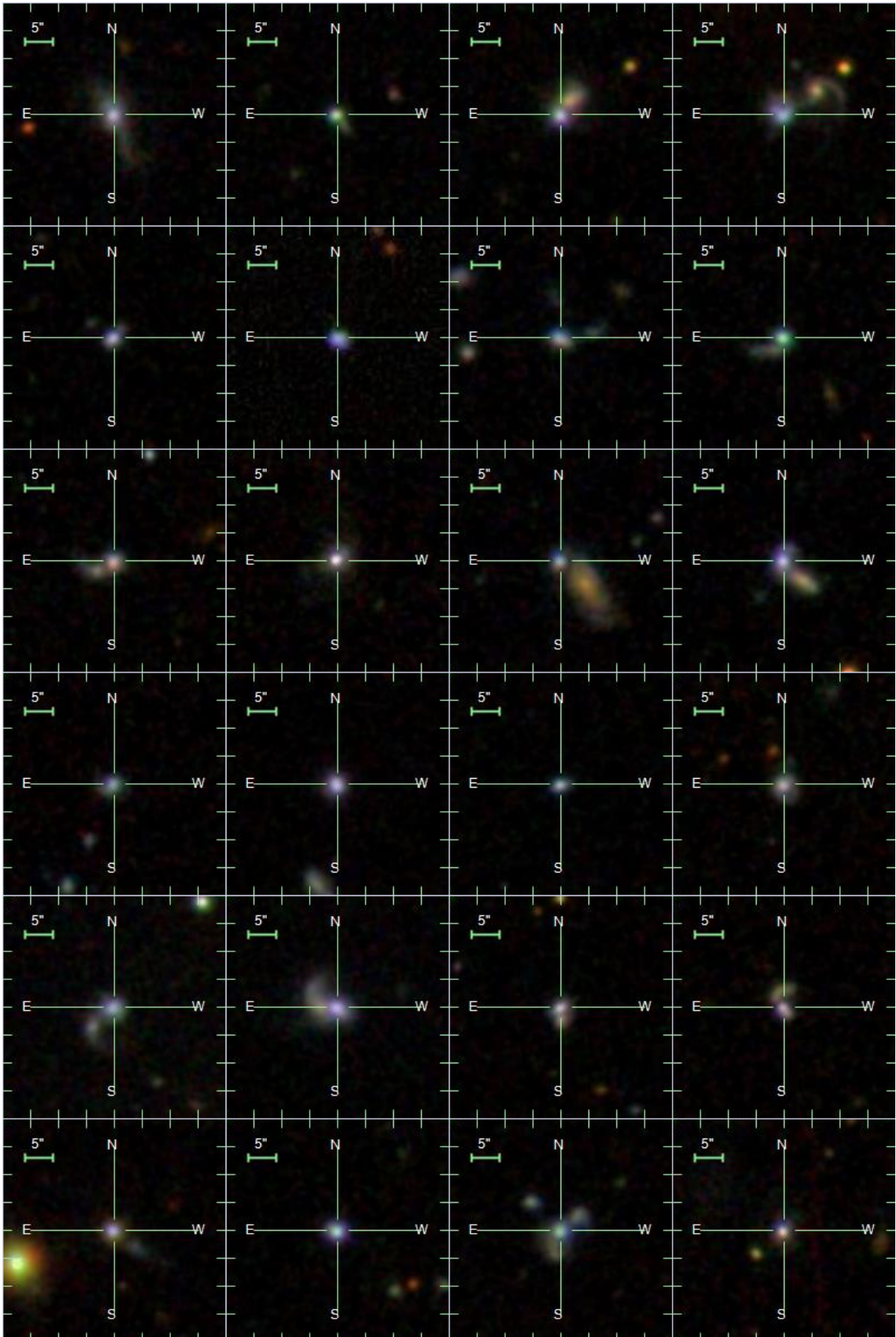
Fonte: DR16 SDSS

Figura 15 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra



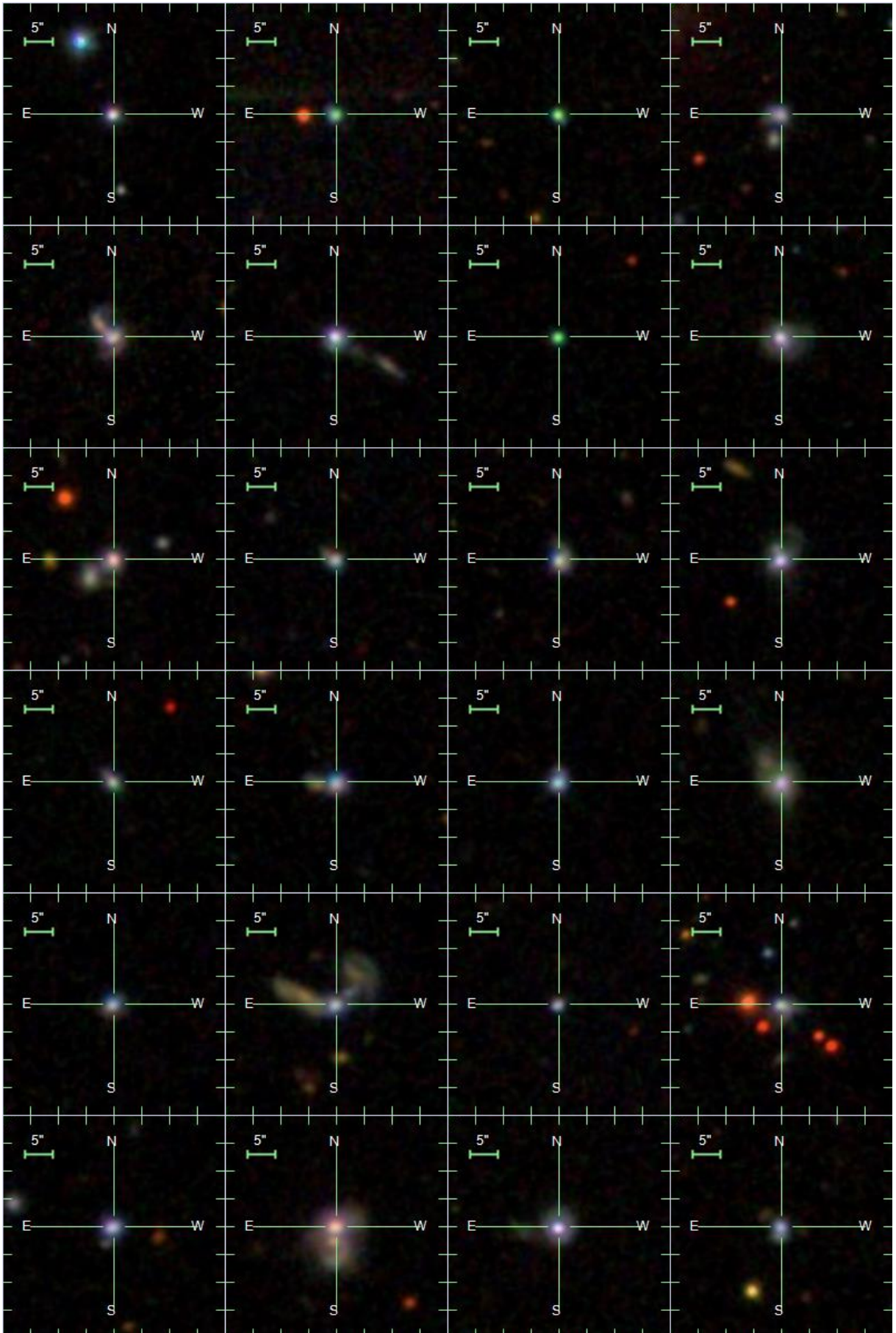
Fonte: DR16 SDSS

Figura 16 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra



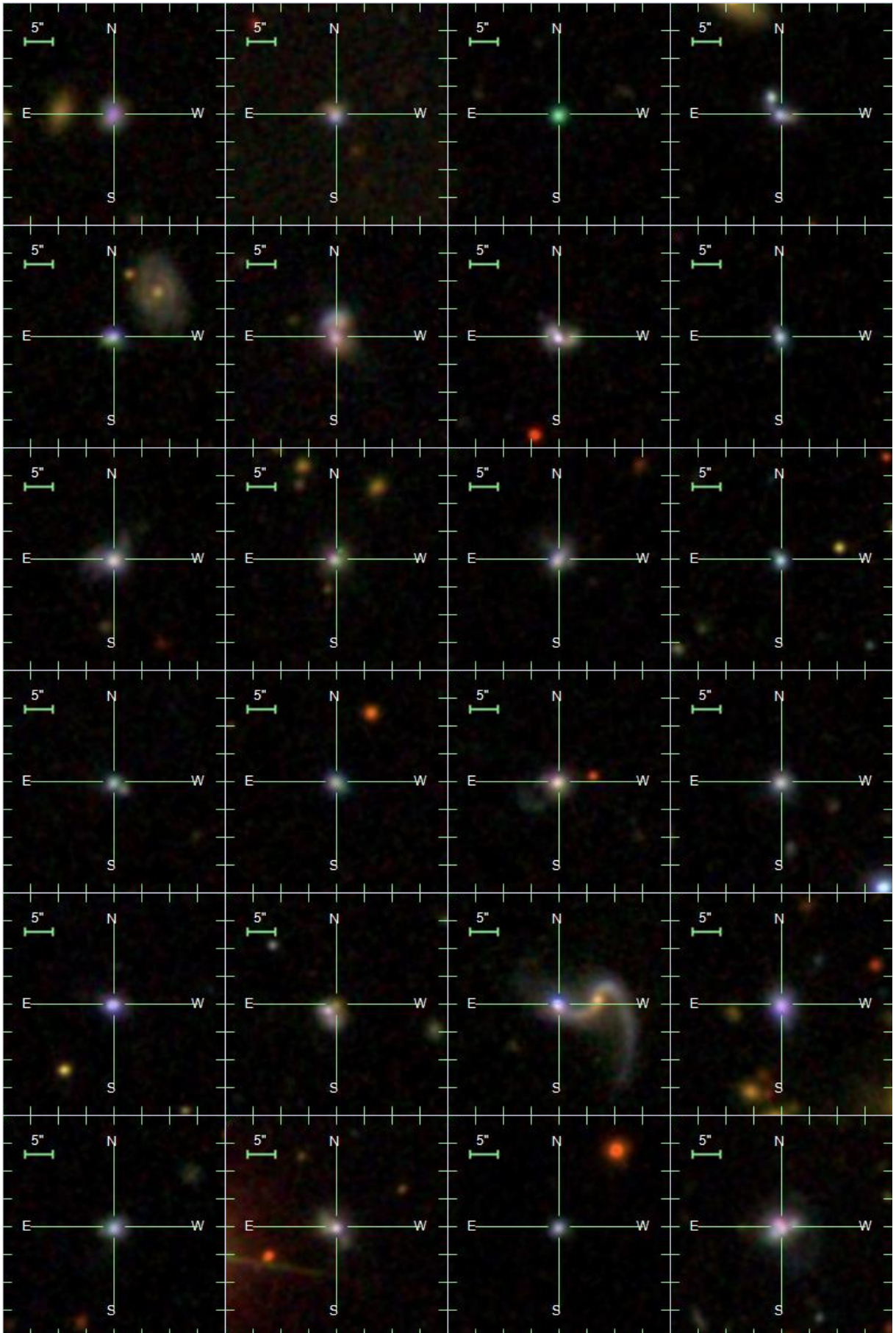
Fonte: DR16 SDSS

Figura 17 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra



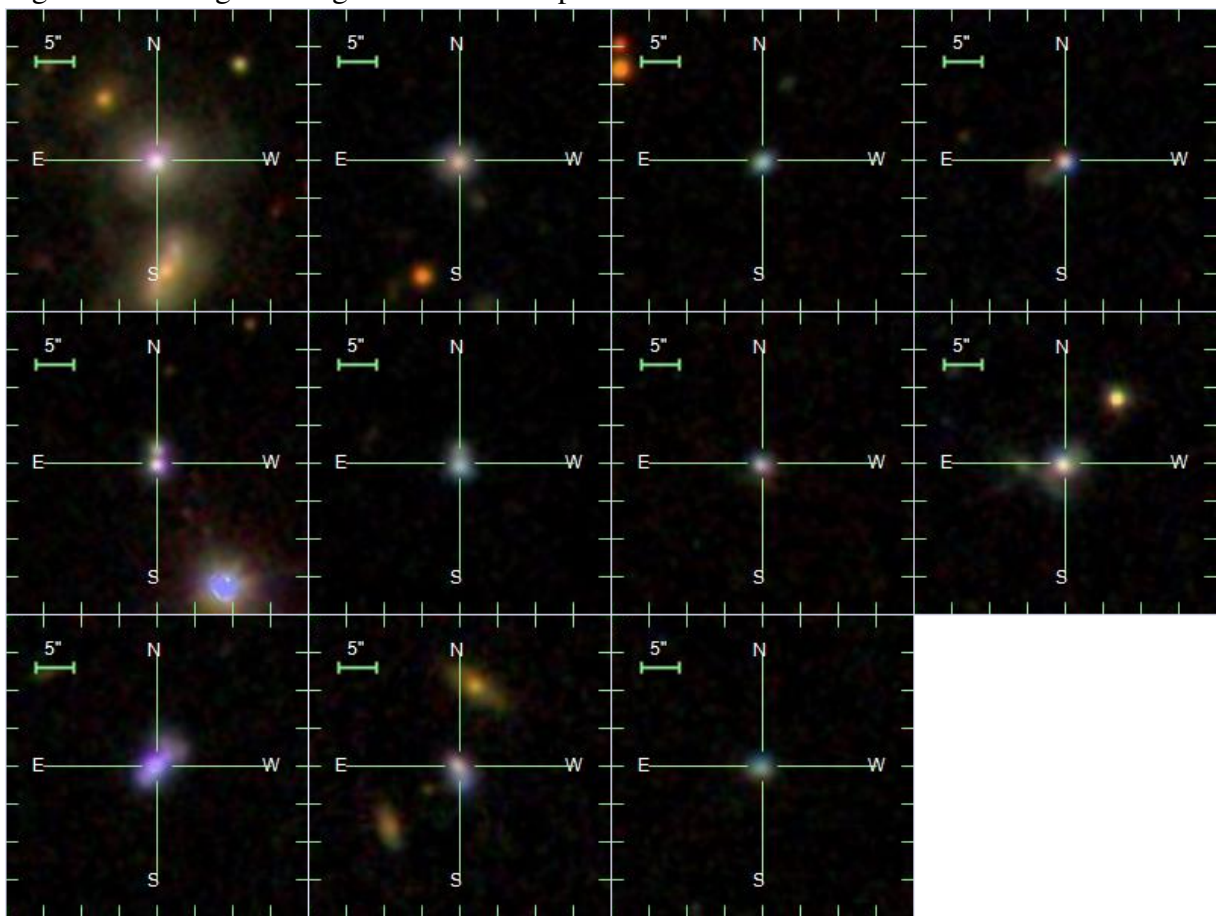
Fonte: DR16 SDSS

Figura 18 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra



Fonte: DR16 SDSS

Figura 19 – Imagens das galáxias ultracompactas selecionadas da amostra



Fonte: DR16 SDSS

3 METODOLOGIA

3.1 Método Friends of Friends

O método Friends of Friends (amigos dos amigos) foi usado pela primeira vez para definir halos na formação hierárquica de estruturas em simulações cosmológicas. O algoritmo define halos como estruturas cujas partículas são separadas por distâncias menores que um parâmetro, chamado de comprimento de ligação, vezes a distância média entre as partículas (PRESS; DAVIS, 1982).

Na prática, o método é aplicado usando um comprimento de ligação ε e exigindo que qualquer partícula que encontre outra partícula dentro de uma distância ε esteja ligada a ela para formar um grupo. Uma partícula está ligada diretamente a todas as outras partículas dentro de uma distância ε (seus amigos) e indiretamente a todas as partículas que estão ligadas a seus amigos (amigos dos amigos). Criando assim redes de partículas ligadas que são chamadas de grupos. O tamanho de um grupo é o número de partículas nesse grupo. Se uma partícula não encontrar nenhuma outra partícula dentro de ε , ela formará seu próprio grupo de tamanho ε .

Na Figura 20, as partículas A e B são amigas, bem como B e C, porém A e C não são pois a distância entre A e C é maior que ε . A e C são amigos de amigos via B. Na figura, a relação FoF induz uma partição nas partículas onde todos os pontos pretos preenchidos estão em um aglomerado e todos os pontos não preenchidos estão em outro.

3.2 Método do k-ésimo vizinho mais próximo

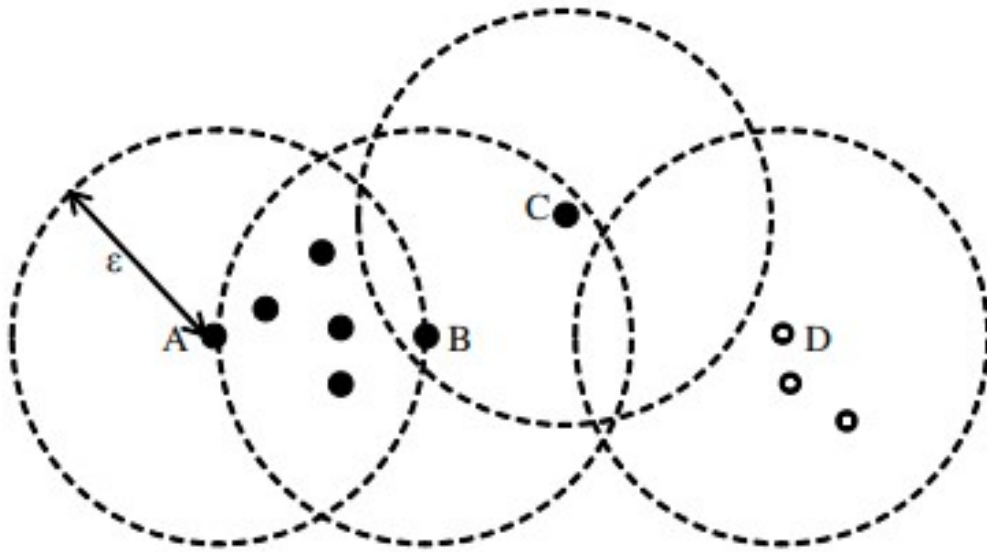
Para um número fixo de vizinhos, temos o método do k-ésimo vizinho mais próximo, do inglês k-nearest neighbor (KNN), que consiste em escolher um valor de k e medir a distância até o k-ésimo vizinho mais próximo da galáxia escolhida calculando a densidade projetada no céu, δ_k , definido por

$$\delta_k = \frac{k}{\pi r_k^2}, \quad (3.1)$$

onde k é o número de vizinhos e r_k é a distância radial projetada até o k-ésimo vizinho mais próximo (SANTANA-SILVA *et al.*, 2020).

Como estamos observando objetos no céu, duas galáxias podem parecer mais próximas do que estão de fato por um efeito de projeção. Para diminuir esse efeito podemos adotar

Figura 20 – Algoritmo de agrupamento Friends of Friends



Duas partículas são consideradas amigas se a distância entre elas for menor que um limiar e a relação de amizade é simétrica se a distância for simétrica. Aqui, A e C formam um par de amigos via B. A relação FoF induz uma partição nas partículas, ou seja, todos pontos pretos estão em um aglomerado e os pontos brancos estão em outro.

Fonte: (KWON *et al.*, 2010)

cortes de velocidade ou de redshift ao redor da galáxia alvo, definindo a densidade projetada para a região para a galáxia i , Σ_i ,

$$\Sigma_i = \frac{1}{\psi(D_i)} \frac{k}{\pi d_i^2}, \quad (3.2)$$

onde, d_i é a distância comóvel (que não muda conforme o tempo passa) até o k -ésimo vizinho mais próximo, $\psi(D_i)$ é a função de seleção para corrigir o viés de Malmquist (que leva a detecção preferencial de fontes intrinsecamente mais brilhantes) como uma função da distância de acordo com a relação

$$N(D)dD = AD^2\psi(D)dD, \quad (3.3)$$

onde,

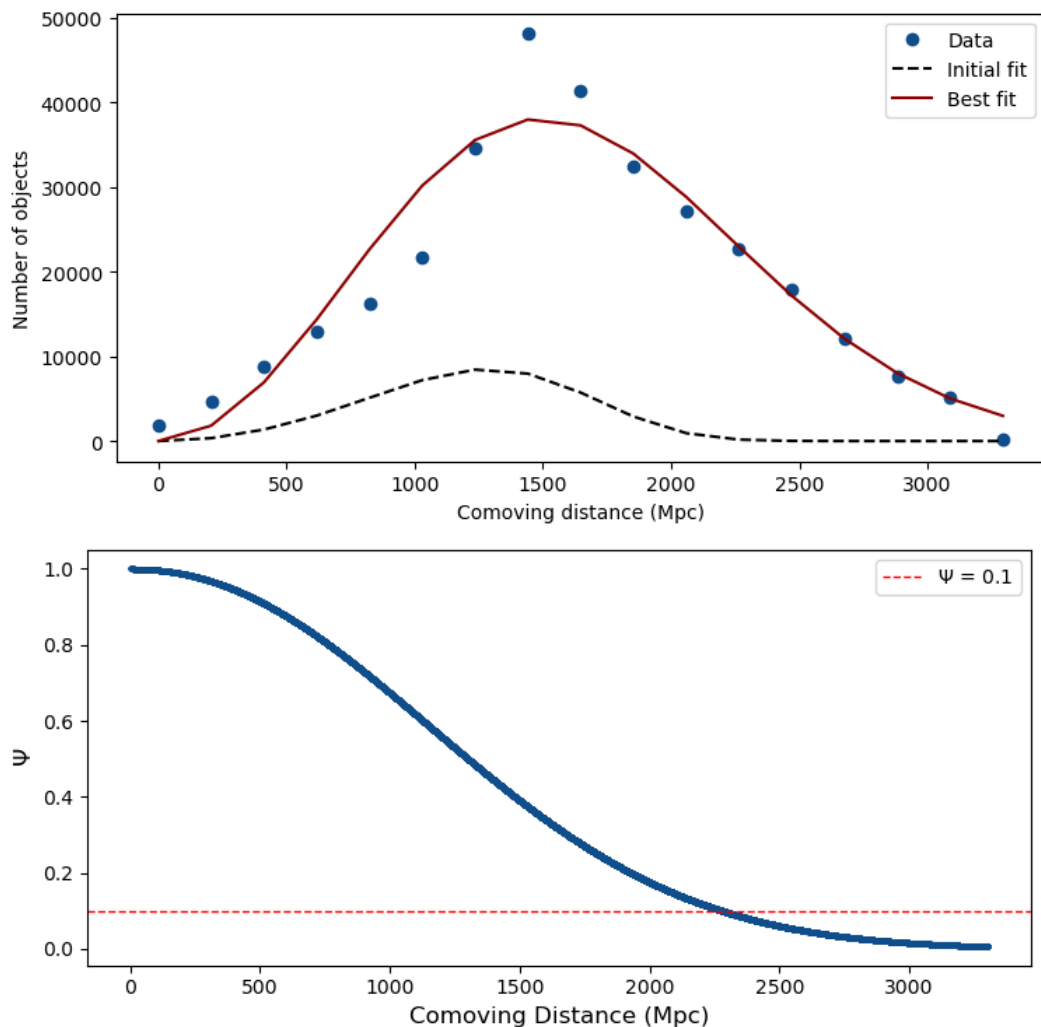
$$\psi(D) = e^{-\left(\frac{D}{D_c}\right)^\alpha}, \quad (3.4)$$

A é um fator de normalização, D_c é uma distância comóvel característica correspondente ao pico da distribuição de redshift, D é a distância comóvel e $N(D)$ é o número de galáxias com

medidas de D (SANTANA-SILVA *et al.*, 2020). Para a amostra escolhida de galáxias temos que $A = 1647.0588$ e $\alpha = 2.1406$.

A densidade local medida é então corrigida, a partir da função de seleção, para cada uma das galáxias pelo fator de $1/\Psi(D)$. Na figura 21, no painel superior, temos a função de seleção como uma função da distância comóvel, e para evitar grandes incertezas e flutuações nas densidades medidas selecionamos apenas galáxias com $\Psi(D) > 0.1$ para diminuir o efeito de medidas experimentalmente ruins de redshift, como visto no painel inferior, aplicamos também um corte em $z \sim 0.02$ para evitar que fontes muito brilhantes sejam confundidas com as LBAs da amostra.

Figura 21 – Distribuição das distâncias comóveis



No painel superior: distribuição das distâncias comóveis. O melhor ajuste; linha sólida vermelha e o ajuste inicial (linha tracejada). Painel inferior: função de seleção (Ψ) em função da distância comóvel. A linha tracejada em vermelho mostra onde $\Psi = 0.1$.

3.3 Teste para o Aglomerado de Coma

Para verificar a precisão do método KNN aplicamos um teste para o Aglomerado de Coma. Isso porque a presença de um aglomerado massivo nesta região permite a obtenção da relação morfologia-densidade de maneira direta observando essa região do espaço.

Também conhecido como Abell 1656, o Aglomerado de Coma (Figura 22 está próximo do polo-norte da Via Láctea, que faz com que esteja livre de obstruções de poeira e gás do plano da Via Láctea, sendo facilmente visível para observadores na Terra. As suas coordenadas de referência, são RA,DEC = 194.9118 , 27.9537 e redshift $z = 0.0231$, com base no catálogo Planck (COLLABORATION *et al.*, 2016). Utilizando a base de dados do SDSS coletamos os valores de redshift espectroscópico, massa, SFR e magnitudes de todas as galáxias dentro da região de tamanho 1 grau quadrado em torno do aglomerado de Coma.

Figura 22 – O Aglomerado de Coma



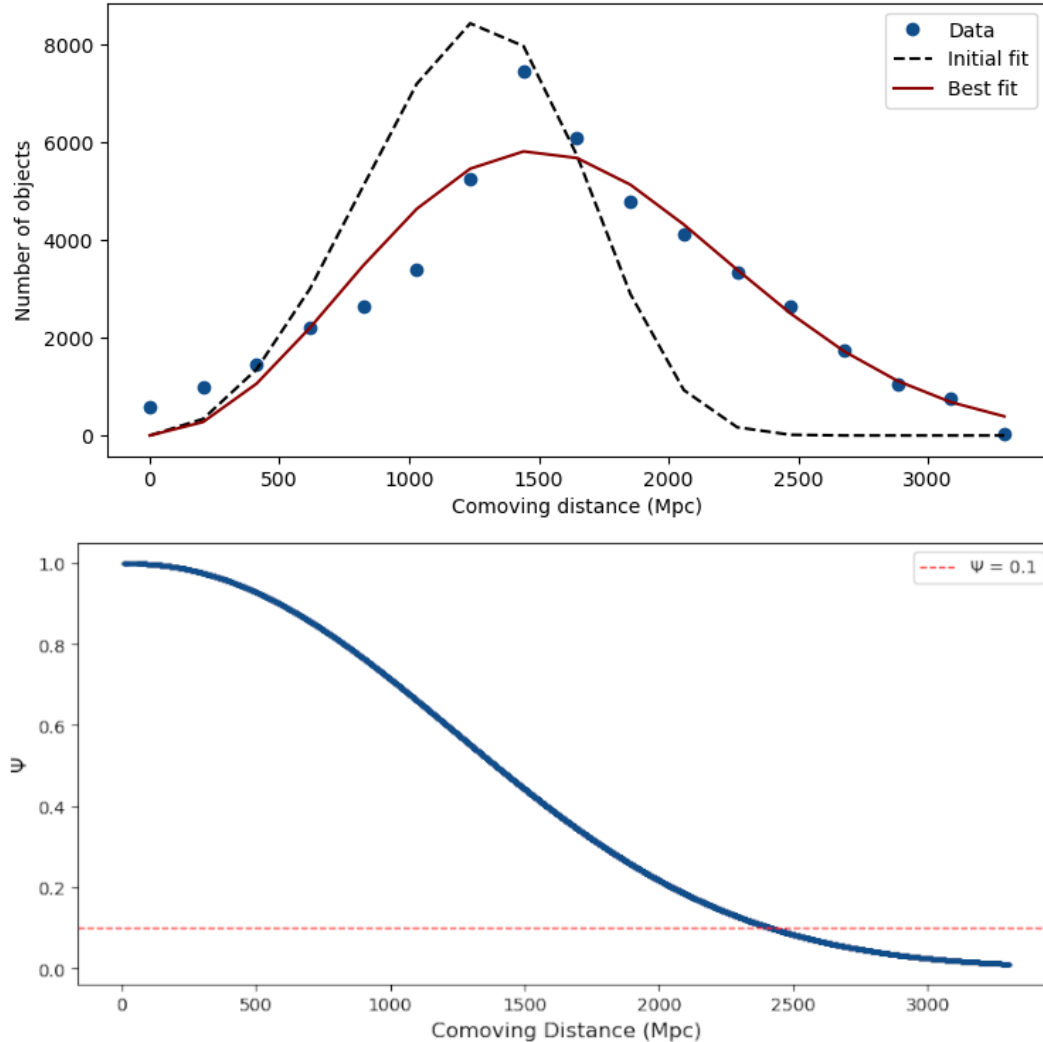
Também conhecido como Abell 1656, o Aglomerado de Coma está a mais de 300 milhões de anos-luz de distância e recebe esse nome por estar na constelação de Coma Berenices.

Fonte: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Aplicamos o método e obtivemos o ajuste da função de seleção para o Aglomerado de Coma da Figura 23. As densidades locais foram corrigidas por um fator de $1/\Psi(D)$. Para

evitar incertezas fizemos um corte da distância comóvel com valor $D = 320\text{Mpc}$ que equivale a $z \sim 0.078$.

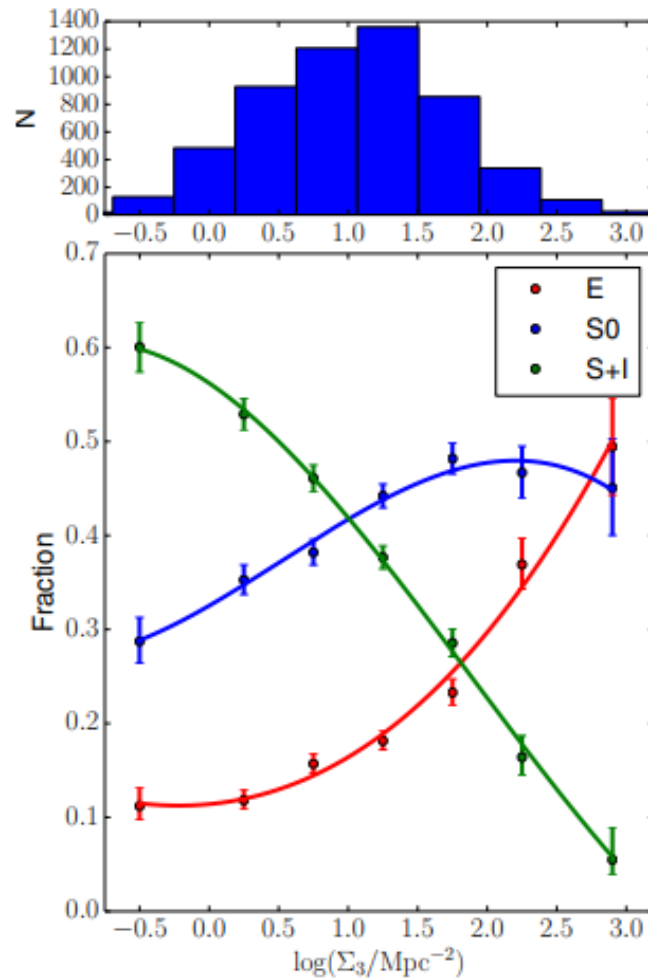
Figura 23 – Distribuição das distâncias comóveis para o aglomerado de Coma



No painel superior: distribuição das distâncias comóveis. O melhor ajuste; linha sólida vermelha e o ajuste inicial (linha tracejada). Painel inferior: função de seleção (Ψ) em função da distância comóvel. A linha tracejada em vermelho mostra onde $\Psi = 0.1$.

Para testar a metodologia descrita podemos conferir uma relação conhecida entre o tipo morfológico de uma galáxia e o ambiente em que está localizada, a relação Morfologia-Densidade da Figura 24. Para isso definimos que uma galáxia quiescente tem uma sSFR, que é uma medida da SFR por unidade de massa, $\leq -11.0M_{\odot}\text{yr}^{-1}$. Selecionando todas as galáxias para o Aglomerado de Coma que estão nesse limite de SFR obtivemos o resultado da Figura 25 ao compararmos a formação de estrelas com a densidade do ambiente para o estimador k10. Observamos então que as galáxias quiescentes são elípticas e ocupam regiões mais densas.

Figura 24 – Relação Morfologia-Densidade

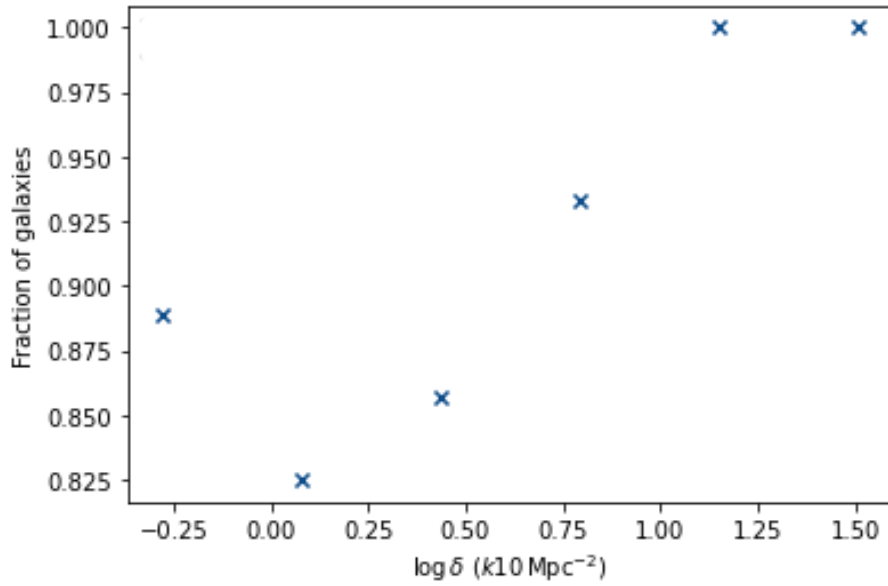


Relação entre a morfologia e densidades até o terceiro vizinho mais próximo. A fração de galáxias espirais é encontrada em regiões de menor densidade enquanto galáxias elípticas estão em regiões mais densas.

Fonte: (HOUGHTON, 2015)

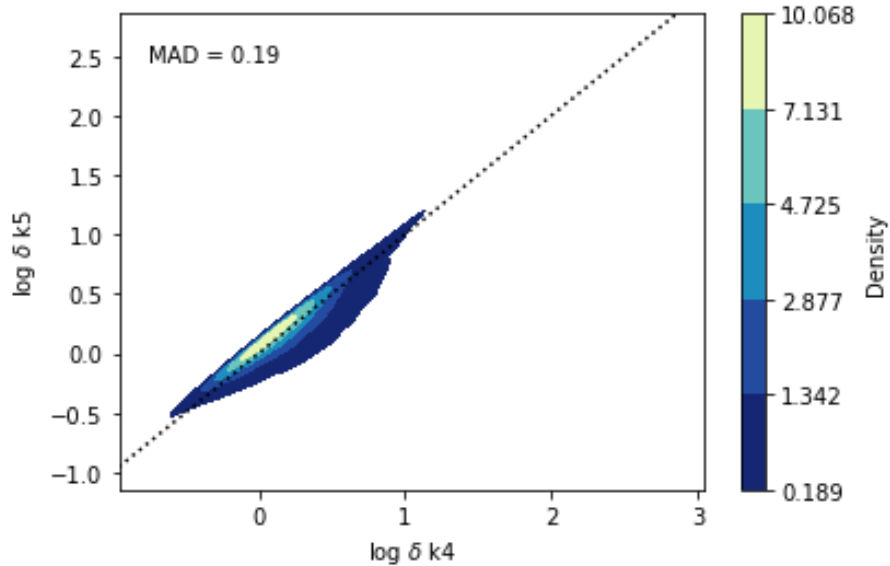
As Figuras 26 a 28 mostram a comparação entre as medidas de densidade superficial utilizando os estimadores k_4 (quarto vizinho próximo), k_5 (quinto vizinho próximo) e k_{10} (décimo vizinho próximo) para o Aglomerado de Coma. Na Figura 26 notamos a presença de um corte superior na distribuição dos objetos no gráfico, que representam os casos extremos onde temos valores iguais de k_4 e k_5 e são uma particularidade do método quando temos valores semelhantes de k .

Figura 25 – Relação entre a SFR e medidas de densidade para K10 para o Aglomerado de Coma



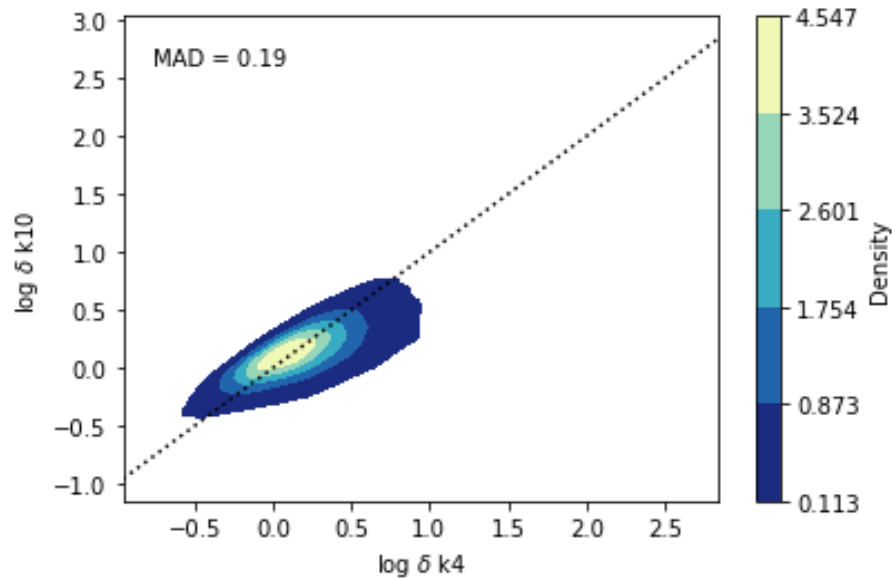
Relação entre a SFR e medidas de densidade local utilizando o estimador k10 para o Aglomerado de Coma selecionando galáxias que apresentam $\text{SFR} \leq -11.0 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Aqui obtivemos a clássica relação entre a morfologia e o ambiente dessas galáxias, onde temos galáxias elípticas localizadas em ambientes mais densos.

Figura 26 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k4 e k5 para o Aglomerado de Coma



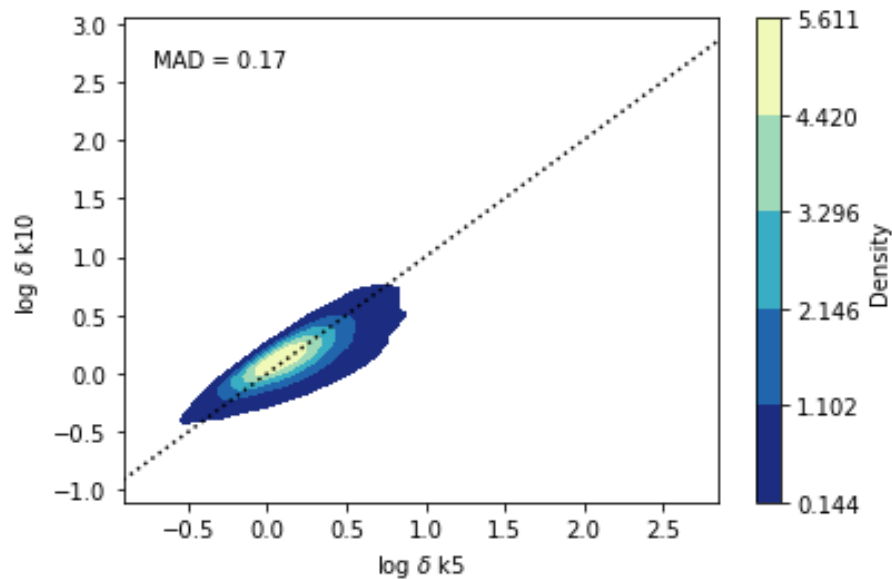
Comparação entre os estimadores k4 e k5, amarelo representa o maior número de objetos da amostra para os valores de k4 e k5, e azul o menor número de objetos. O desvio absoluto médio (MAD) é apresentado no gráfico na linha tracejada.

Figura 27 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k_4 e k_{10} para o Aglomerado de Coma



Comparação entre os estimadores k_4 e k_{10} , amarelo representa o maior número de objetos da amostra para os valores de k_4 e k_{10} , e azul o menor número de objetos. O desvio absoluto médio (MAD) é apresentado no gráfico na linha tracejada.

Figura 28 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k_5 e k_{10} para o Aglomerado de Coma



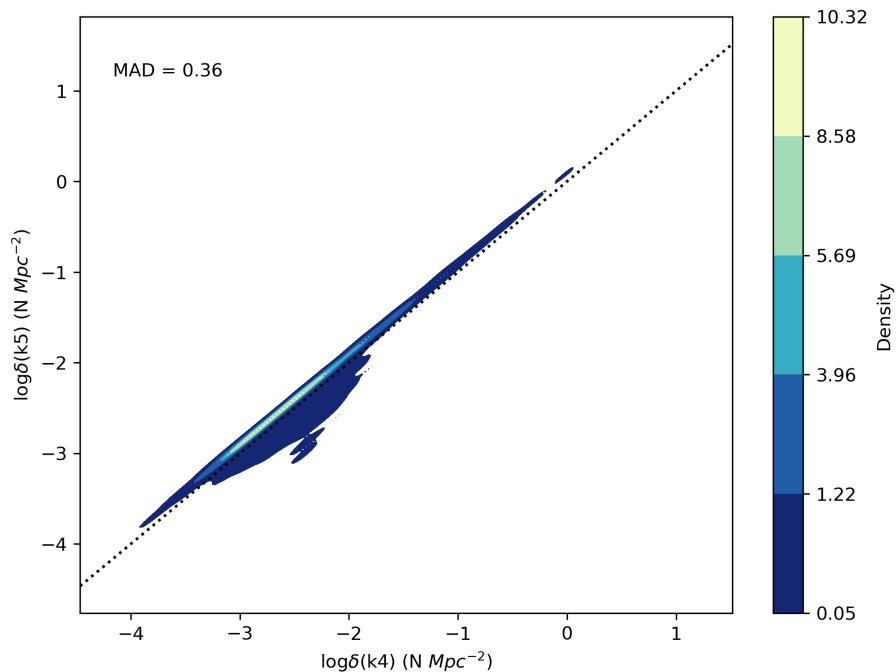
Comparação entre os estimadores k_5 e k_{10} , amarelo representa o maior número de objetos da amostra para os valores de k_5 e k_{10} , e azul o menor número de objetos. O desvio absoluto médio (MAD) é apresentado no gráfico na linha tracejada.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados do teste de densidade

Aplicando o método de vizinhos próximos obtivemos os resultados para o estudo ambiental para as 155 LBAs selecionadas. Comparamos as SFR às medidas de densidades para todas as galáxias da amostra com os estimadores k_4 , k_5 e k_{10} (quarto, quinto e décimo vizinho próximo, respectivamente) e calculamos o desvio absoluto médio (MAD) entre as medidas para facilitar a comparação. As Figuras 30 a 31 mostram os resultados para esses casos.

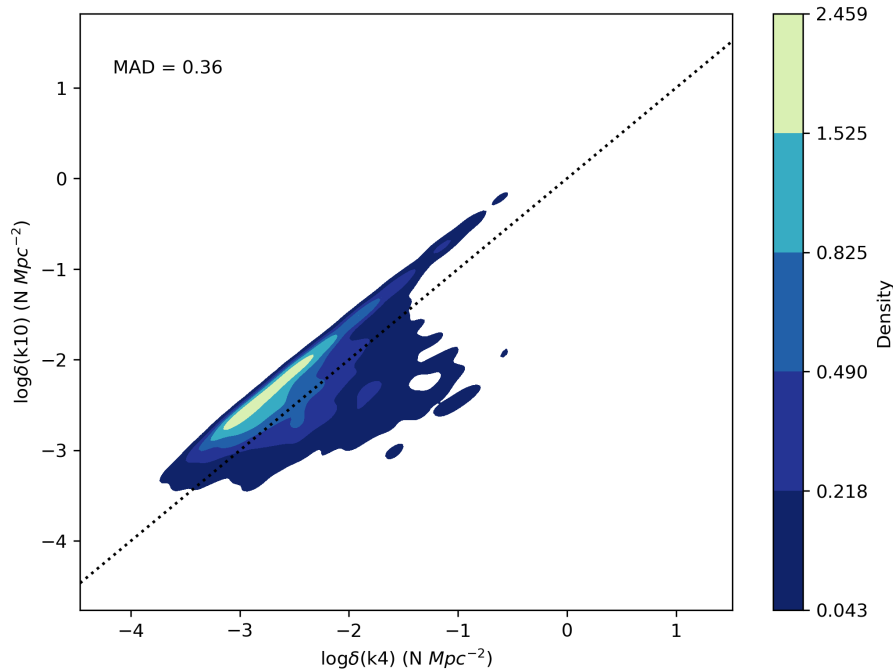
Figura 29 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k_4 e k_5



Comparação entre os estimadores k_4 e k_5 , amarelo representa o maior número de objetos da amostra para os valores de k_4 e k_5 , e azul o menor número de objetos. O desvio absoluto médio (MAD) é apresentado no gráfico na linha tracejada

Galáxias que estão localizadas em regiões que apresentam valores de densidades maiores que 0.7 podem estar em pares ou em grupos, e regiões mais densas que 1.5 estão associadas a aglomerados. Não encontramos galáxias com esses valores nas medidas de densidade para a amostra selecionada. Assim, podemos concluir que as LBAs não estão associadas a aglomerados de galáxias. Esse resultado está limitado ao fato de o SDSS não detectar galáxias muito fracas. Desse modo, detectar baixas densidades pode ser algo resultante da incompletude

Figura 30 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k4 e k10



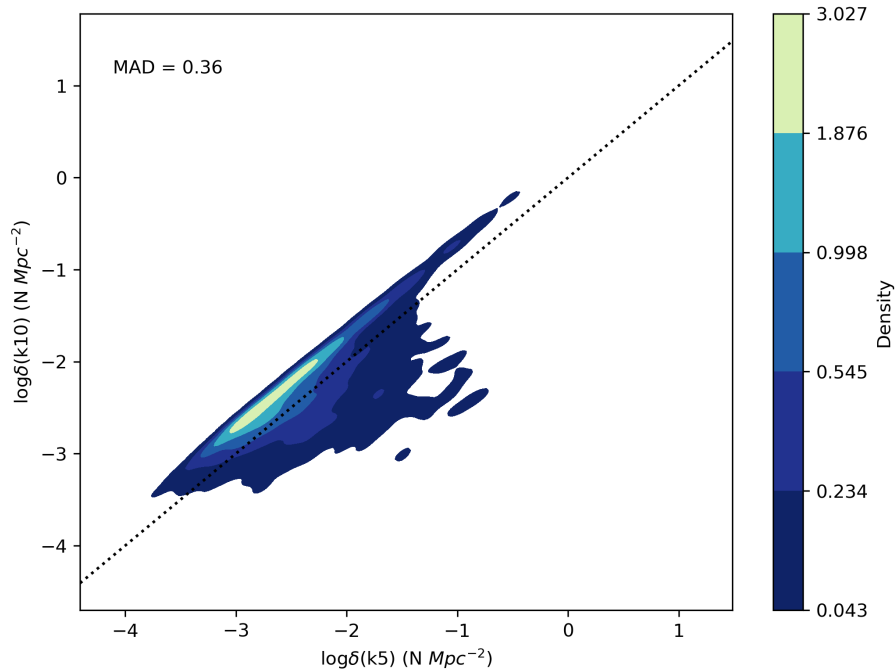
Comparação entre os estimadores k4 e k10, amarelo representa o maior número de objetos da amostra para os valores de k4 e k10, e azul o menor número de objetos. O desvio absoluto médio (MAD) é apresentado no gráfico na linha tracejada.

do levantamento, que não apresenta um número considerável de objetos de maior magnitude.

Se compararmos os resultados das densidades locais com trabalhos que buscam influência do ambiente em galáxias que tem formação estelar, verificamos que as LBAs aparecem em ambientes de maior densidade (SANTANA-SILVA *et al.*, 2020) onde as LBAs selecionadas foram analisadas a partir de um levantamento com um número maior de objetos de magnitudes mais altas o que pode explicar a detecção de regiões mais densas.

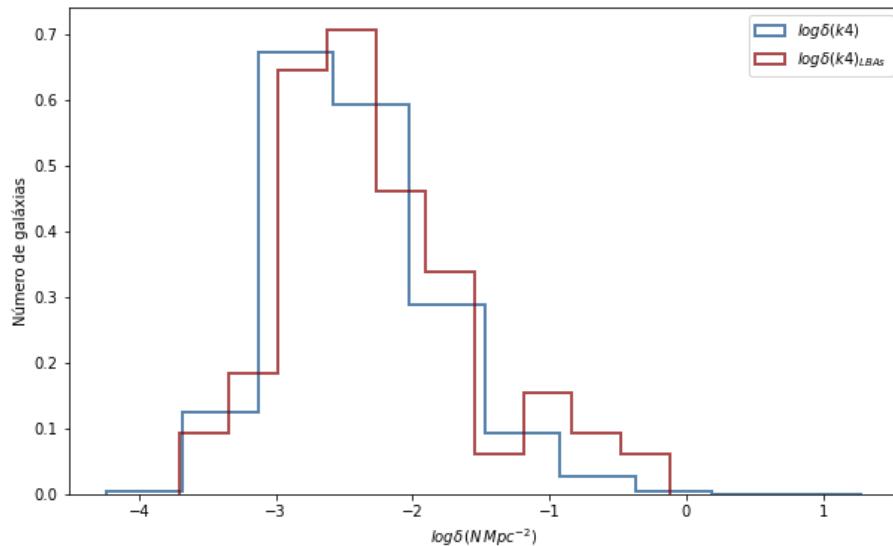
Para verificar se há uma diferença significativa entre as densidades obtidas aplicamos o teste Kolmogorov-Smirnov (KS) entre os valores das LBAs e da população geral de galáxias da amostra. As Figuras 32 a 34 mostram o resultado da comparação para cada um dos estimadores de densidade. Para o estimador k4 obtivemos $p\text{-value} \sim 17\%$ ($D = 0.1141$ e $p\text{-value} = 0.1727$), para k5 obtivemos $D = 0.0781$ e $p\text{-value} = 0.6067$, e para k10 obtivemos $D = 0.0463$ e $p\text{-value} = 0.9850$, que nos diz que as LBAs fazem parte da mesma população que a população geral.

Figura 31 – Comparação entre as medidas de densidade superficial usando os estimadores k5 e k10



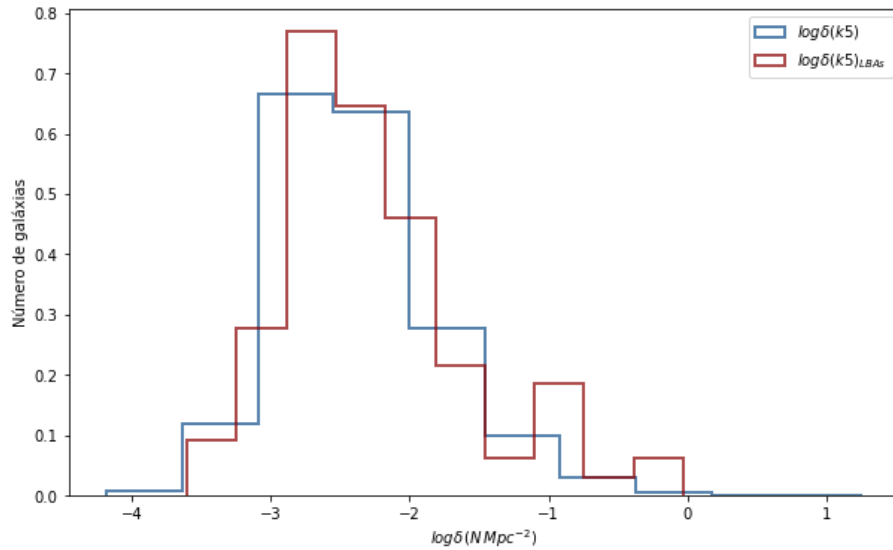
Comparação entre os estimadores k5 e k10, amarelo representa o maior número de objetos da amostra para os valores de k5 e k10, e azul o menor número de objetos. O desvio absoluto médio (MAD) é apresentado no gráfico na linha tracejada.

Figura 32 – Distribuição de medidas de densidade para o estimador k4



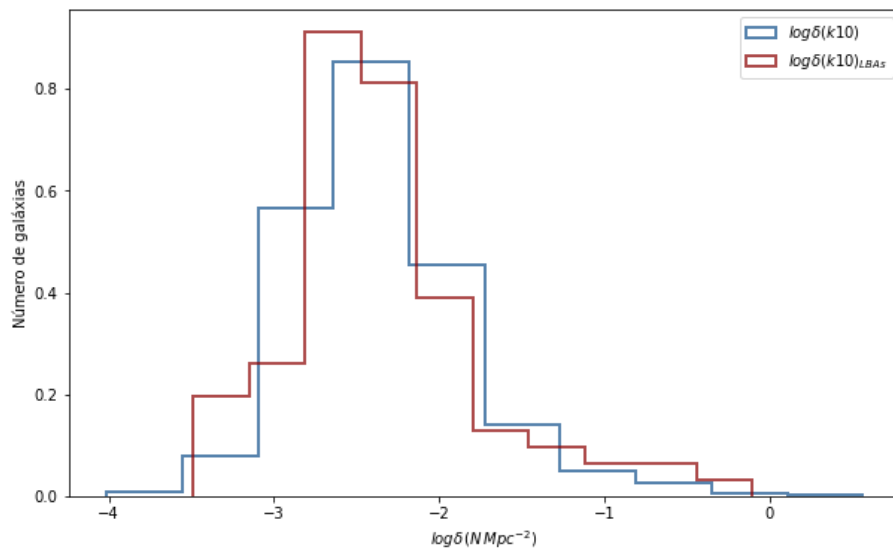
Comparação para o estimador k4 entre as medidas de densidade para as LBAs (em vermelho) e população geral de galáxias (em azul). Obtivemos p -value $\sim 17\%$ ($D = 0.1141$ e p -value = 0.1727) em concordância com as medidas de densidade parecidas, os dois grupos pertencendo a mesma população de galáxias.

Figura 33 – Distribuição de medidas de densidade para o estimador k5



Comparação para o estimador k5 entre as medidas de densidade para as LBAs (em vermelho) e população geral de galáxias (em azul). Obtivemos $D = 0.0781$ e $p - value = 0.6067$ em concordância com as medidas de densidade parecidas, os dois grupos pertencendo a mesma população de galáxias

Figura 34 – Distribuição de medidas de densidade para o estimador k10



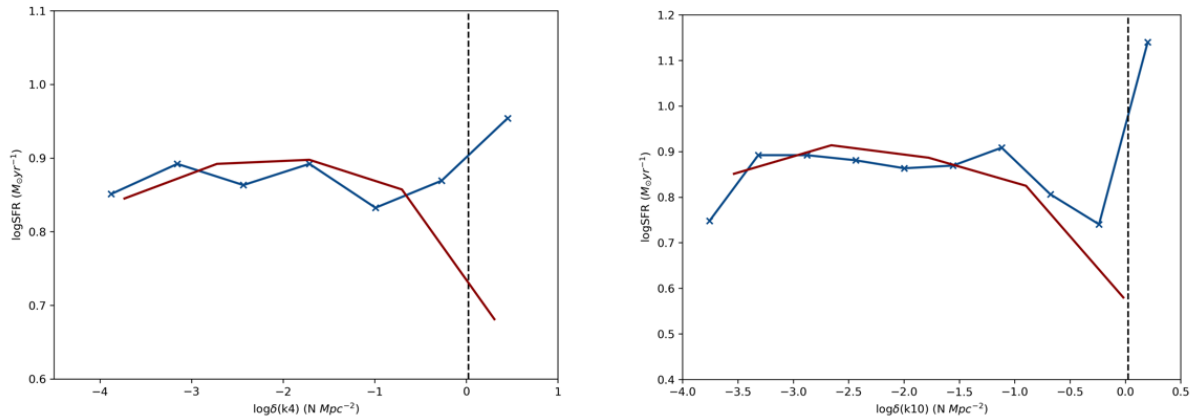
Comparação para o estimador k10 entre as medidas de densidade para as LBAs (em vermelho) e população geral de galáxias (em azul). Obtivemos $D = 0.0463$ e $p - value = 0.9850$ em concordância com as medidas de densidade parecidas, os dois grupos pertencendo a mesma população de galáxias.

4.2 Resultados para comparação das massas

A dependência ambiental entre a SFR em função dos estimadores de densidade k4 e k10 é usada para comparar as propriedades das LBAs selecionadas com as demais galáxias

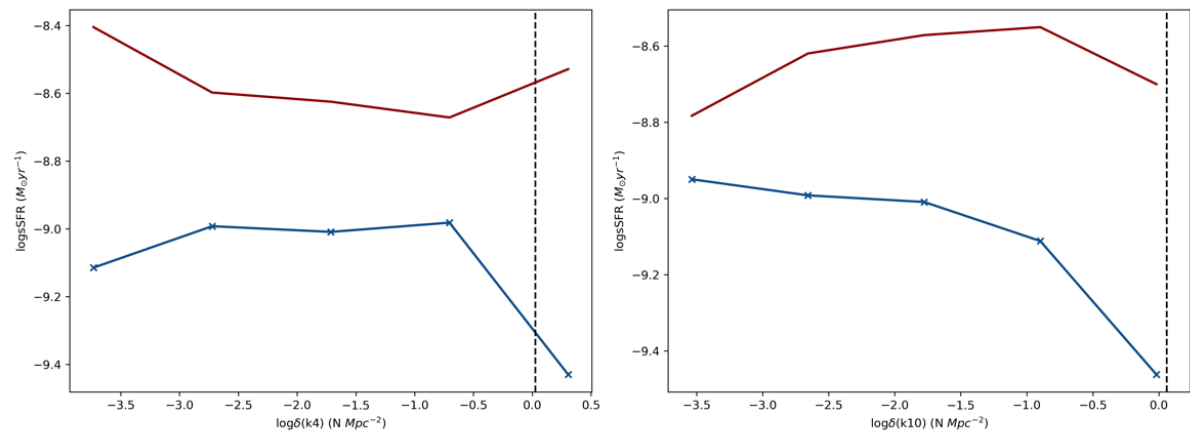
da amostra nas Figuras 35 e 36. Essa comparação nos dá as possíveis influências do ambiente na SFR e massa das galáxias. Os resultados mostram que as LBAs selecionadas estão em ambientes com densidade no mesmo intervalo da amostra geral de galáxias.

Figura 35 – Comparação entre os estimadores k4 e k10 e SFR



Dependência do ambiente na SFR para a amostra de LBAs (em vermelho) e para a população geral de galáxias (em azul) em função dos estimadores k4 (gráfico da esquerda) e k10 (gráfico da direita). Aqui é visível que as LBAs da amostra se encontram no mesmo intervalo de densidade ambiental da amostra geral de galáxias.

Figura 36 – Relação entre estimadores k4 e k10 e sSFR

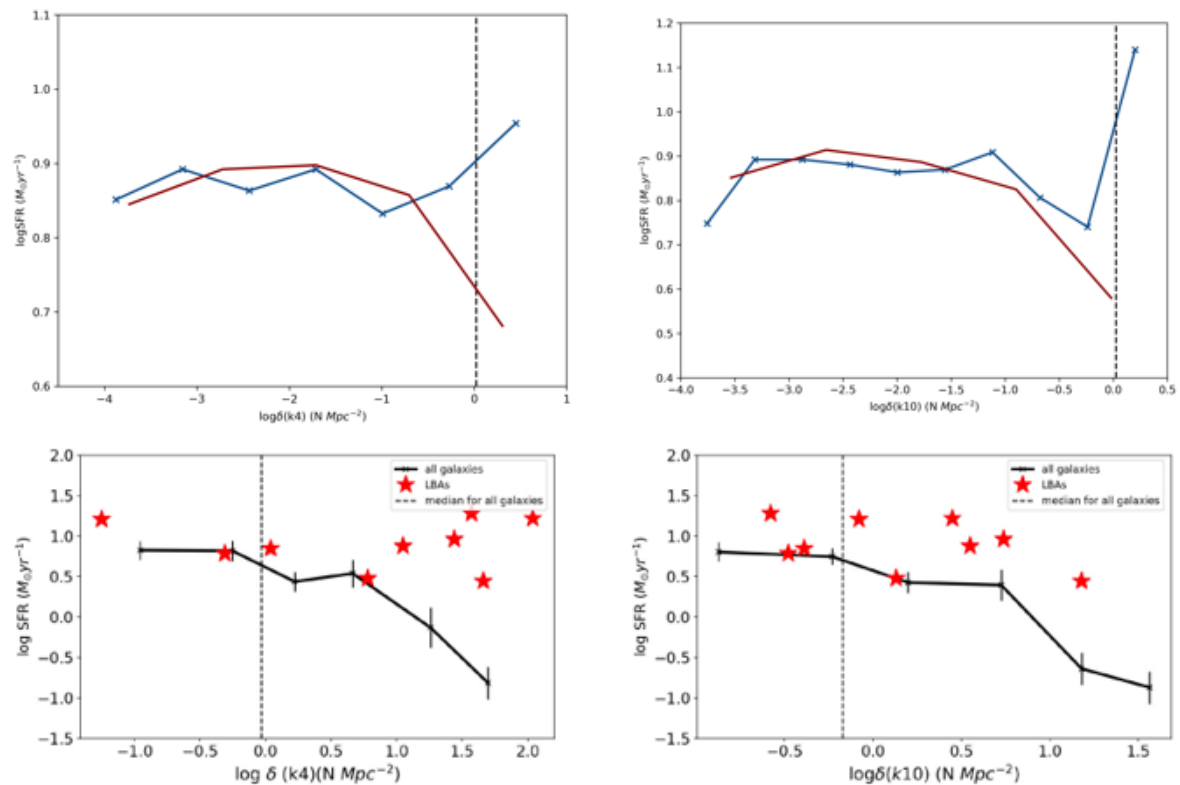


Dependência do ambiente na sSFR para a amostra de LBAs (em vermelho) e para a população geral de galáxias (em azul) em função dos estimadores k4 (gráfico da esquerda) e k10 (gráfico da direita). Aqui é visível que as LBAs têm uma taxa de formação estelar mais alta e que se encontram no mesmo intervalo de densidade ambiental da amostra geral de galáxias.

Ao compararmos os resultados de dependência do ambiente e SFR com o de trabalhos da mesma área notamos novamente que a diferença observada entre as LBAs selecionadas na amostra deste trabalho se deve a quantidade de objetos de magnitude menor ser menos expressiva.

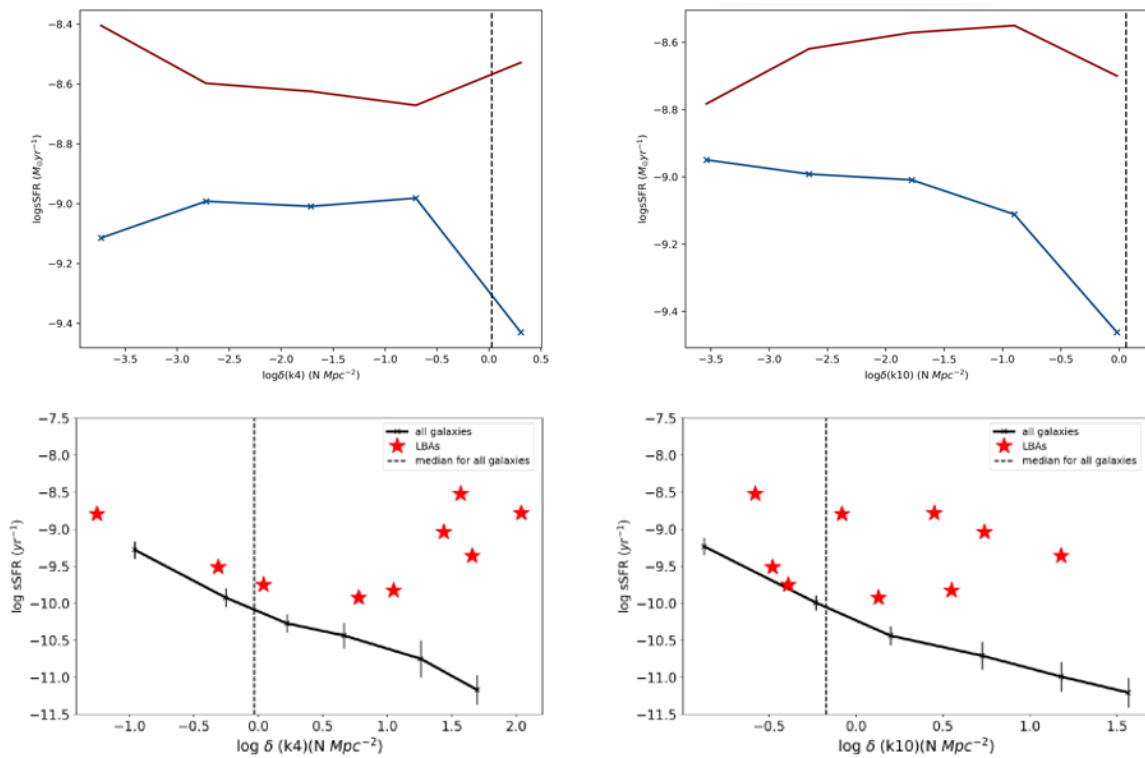
Na Figura 37 vemos que em outras análises LBAs em média ocupam ambientes mais densos (SANTANA-SILVA *et al.*, 2020). E o mesmo pode ser dito se compararmos também a sSFR como na Figura 38. Podemos atribuir esse resultado de baixas densidades ao SDSS não ser um levantamento completo em magnitudes maiores.

Figura 37 – Comparação entre os estimadores k4 e k10 e SFR



Comparação da dependência ambiental da SFR em função dos estimadores de densidade k4 e k10. Em vermelho as LBAs selecionadas e em azul as demais galáxias da amostra, no painel superior. Os gráficos no painel de baixo mostram os resultados da literatura para uma amostra com características semelhantes mas em menor quantidade de LBAs utilizando o ELBA Survey (SANTANA-SILVA *et al.*, 2020). As estrelas vermelhas representam as LBAs e a linha preta as galáxias da amostra geral.

Figura 38 – Comparação da dependência ambiental da sSFR em função dos estimadores de densidade k_4 e k_{10}



Comparação da dependência ambiental da sSFR em função dos estimadores de densidade k_4 e k_{10} . Em vermelho as LBAs selecionadas e em azul as demais galáxias da amostra, no painel superior. Os gráficos no painel de baixo mostram os resultados da literatura para uma amostra com características semelhantes mas em menor quantidade de LBAs e utilizando o ELBA Survey (SANTANA-SILVA *et al.*, 2020). As estrelas vermelhas representam as LBAs e a linha preta as galáxias da amostra geral.

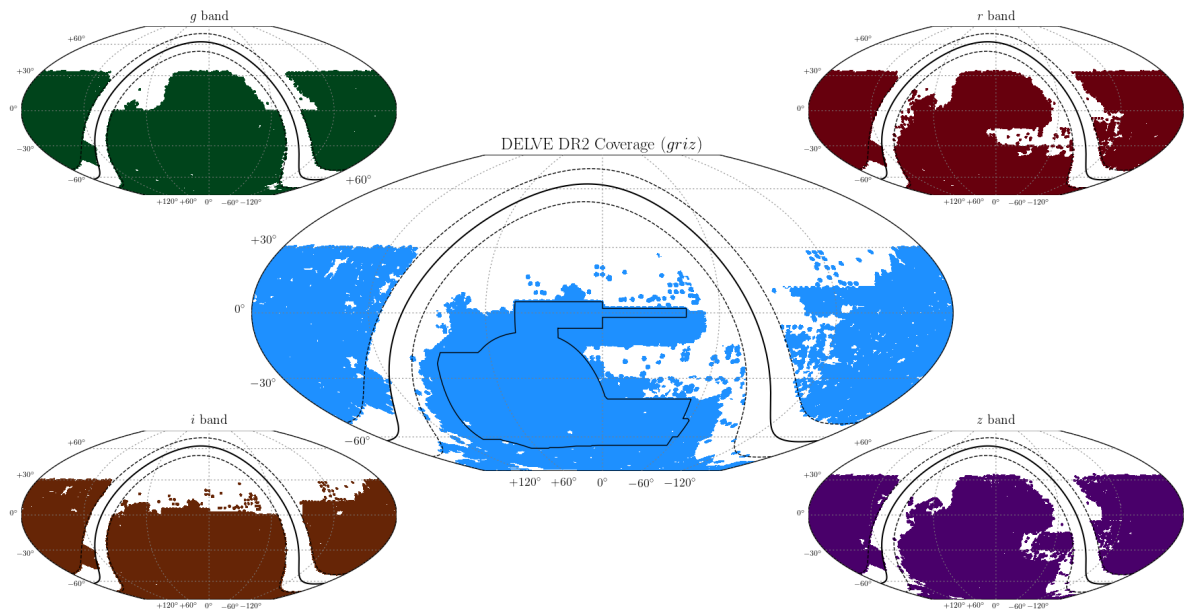
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que as LBAs não estão localizadas em ambientes em média mais densos que a amostra geral de UVLGs, e apresentam uma sSFR mais alta. Este resultado em especial poderia ser melhor analisado partindo de imagens mais profundas onde galáxias menos brilhantes que habitam o ambiente das LBAs selecionadas poderiam ser detectadas.

Os erros experimentais encontrados na seleção de LBAs deste trabalho podem ser remediados se usarmos uma amostra maior. Para isso, um projeto futuro é de realizar as medidas de densidade do método deste trabalho utilizando um levantamento maior, que cobre o céu do hemisfério sul, obtendo assim um catálogo mais robusto e inédito de LBAs, visto que os levantamentos anteriores são do hemisfério norte.

O DELVE DR2 (DECam Local Volume Exploration Survey Data Release 2), combina novas observações da DECcam (Dark Energy Cam) com dados arquivados da DECcam provenientes do Dark Energy Survey, do DECcam Legacy Survey e de outros programas da comunidade DECcam e é composto por cerca de 160000 exposições que cobrem mais de 21000 deg^2 do céu de alta latitude galáctica em quatro filtros ópticos/infravermelhos de banda larga (g, r, i, z), fornecendo fotometria para aproximadamente 2,5 bilhões de fontes astronômicas. Foram obtidas imagens de uma região de aproximadamente 17000 deg^2 em todos os quatro filtros, fornecendo medições fotométricas de quatro bandas para aproximadamente 618 milhões de fontes astronômicas, como mostrado na Figura 39. O DELVE DR2 cobre mais de 4 vezes a área do lançamento de dados anterior do DELVE e contém aproximadamente 5 vezes mais objetos astronômicos. Assim, será possível caracterizar o ambiente de LBAs e como são comparáveis às LBGs. Além de explicar quais possíveis processos ambientais são os responsáveis pela aparição dessas relações entre SFR e massa desse tipo de galáxia de maneira mais completa.

Figura 39 – DELVE DR2



O DELVE DR2 cobre mais de 20000 deg^2 em cada uma das bandas g, r, i, z (regiões coloridas) e aproximadamente 17000 deg^2 em todas as quatro bandas simultaneamente (região azul). A área de $\sim 5000 \text{ deg}^2$ do DES está delimitada em preto. Esses mapas celestes estão mostrados na projeção de McBryde-Thomas, uma projeção plana polar quartica de área igual.

REFERÊNCIAS

APPENZELLER, I. **High-redshift galaxies**. Berlin, Germany: Springer, 2016. (Astronomy and Astrophysics Library).

BUTCHER, H.; OEMLER A., J. The evolution of galaxies in clusters. i. isit photometry of cl 0024+1654 and 3c 295. **The Astrophysical Journal**, v. 219, p. 18–30, jan. 1978. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978ApJ...219...18B>. Acesso em: 16 ago. 2023.

CARILLI, C. L.; LEE, N.; CAPAK, P.; SCHINNERER, E.; LEE, K.-S.; MCCRAKEN, H.; YUN, M. S.; SCOVILLE, N.; SMOLČIĆ, V.; GIAVALISCO, M.; DATTA, A.; TANIGUCHI, Y.; URRY, C. M. Star formation rates in lyman break galaxies: Radio stacking of lbg's in the cosmos field and the sub-jy radio source population*. **The Astrophysical Journal**, The American Astronomical Society, v. 689, n. 2, p. 883, dec 2008. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/592319>. Acesso em: 16 ago. 2023.

COCHRANE, R. K.; BEST, P. N.; SOBRAL, D.; SMAIL, I.; GEACH, J. E.; STOTT, J. P.; WAKE, D. A. The dependence of galaxy clustering on stellar mass, star-formation rate and redshift at $z = 0.8-2.2$, with hizels. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 475, n. 3, p. 3730–3745, 01 2018. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx3345>. Acesso em: 16 ago. 2023.

COLLABORATION, P.; ADE, P. A. R.; AGHANIM, N.; ARNAUD, M.; ASHDOWN, M.; AUMONT, J.; BACCIGALUPI, C.; BANDAY, A. J.; BARREIRO, R. B.; BARTLETT, J. G.; BARTOLO, N.; BATTANER, E.; BATTYE, R.; BENABED, K.; BENOÎT, A.; BENOIT-LÉVY, A.; BERNARD, J. P.; BERSANELLI, M.; BIELEWICZ, P.; BOCK, J. J.; BONALDI, A.; BONAVERA, L.; BOND, J. R.; BORRILL, J.; BOUCHET, F. R.; BOULANGER, F.; BUCHER, M.; BURIGANA, C.; BUTLER, R. C.; CALABRESE, E.; CARDOSO, J. F.; CATALANO, A.; CHALLINOR, A.; CHAMBALLU, A.; CHARY, R. R.; CHIANG, H. C.; CHLUBA, J.; CHRISTENSEN, P. R.; CHURCH, S.; CLEMENTS, D. L.; COLOMBI, S.; COLOMBO, L. P. L.; COMBET, C.; COULAIS, A.; CRILL, B. P.; CURTO, A.; CUTTAIA, F.; DANESE, L.; DAVIES, R. D.; DAVIS, R. J.; BERNARDIS, P. de; ROSA, A. de; ZOTTI, G. de; DELABROUILLE, J.; DÉSSERT, F. X.; VALENTINO, E. D.; DICKINSON, C.; DIEGO, J. M.; DOLAG, K.; DOLE, H.; DONZELLI, S.; DORÉ, O.; DOUSPIS, M.; DUCOUT, A.; DUNKLEY, J.; DUPAC, X.; EFSTATHIOU, G.; ELSNER, F.; ENSSLIN, T. A.; ERIKSEN, H. K.; FARHANG, M.; FERGUSSON, J.; FINELLI, F.; FORNI, O.; FRAILIS, M.; FRAISSE, A. A.; FRANCESCHI, E.; FREJSEL, A.; GALEOTTA, S.; GALLI, S.; GANGA, K.; GAUTHIER, C.; GERBINO, M.; GHOSH, T.; GIARD, M.; GIRAUD-HÉRAUD, Y.; GIUSARMA, E.; GJERLØW, E.; GONZÁLEZ-NUEVO, J.; GÓRSKI, K. M.; GRATTON, S.; GREGORIO, A.; GRUPPUSO, A.; GUDMUNDSSON, J. E.; HAMANN, J.; HANSEN, F. K.; HANSON, D.; HARRISON, D. L.; HELOU, G.; HENROT-VERSILLÉ, S.; HERNÁNDEZ-MONTEAGUDO, C.; HERRANZ, D.; HILDEBRANDT, S. R.; HIVON, E.; HOBSON, M.; HOLMES, W. A.; HORNSTRUP, A.; HOVEST, W.; HUANG, Z.; HUFFENBERGER, K. M.; HURIER, G.; JAFFE, A. H.; JAFFE, T. R.; JONES, W. C.; JUELA, M.; KEIHÄNEN, E.; KESKITALO, R.; KISNER, T. S.; KNEISSL, R.; KNOCHE, J.; KNOX, L.; Kunz, M.; KURKI-SUONIO, H.; LAGACHE, G.; LÄHTEENMÄKI, A.; LAMARRE, J. M.; LASENBY, A.; LATTANZI, M.; LAWRENCE, C. R.; LEAHY, J. P.; LEONARDI, R.; LESGOURGUES, J.; LEVRIER, F.; LEWIS, A.; LIGUORI, M.; LILJE, P. B.; LINDEN-VØRNLE, M.; LÓPEZ-CANIEGO, M.; LUBIN, P. M.; MACÍAS-PÉREZ, J. F.; MAGGIO, G.; MAINO, D.; MANDOLESI, N.; MANGILLI, A.; MARCHINI, A.; MARIS, M.; MARTIN, P. G.; MARTINELLI, M.;

MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, E.; MASI, S.; MATARRESE, S.; MCGEHEE, P.; MEINHOLD, P. R.; MELCHIORRI, A.; MELIN, J. B.; MENDES, L.; MENNELLA, A.; MIGLIACCIO, M.; MILLEA, M.; MITRA, S.; MIVILLE-DESCHÊNES, M. A.; MONETI, A.; MONTIER, L.; MORGANTE, G.; MORTLOCK, D.; MOSS, A.; MUNSHI, D.; MURPHY, J. A.; NASELSKY, P.; Nati, F.; NATOLI, P.; NETTERFIELD, C. B.; NØRGAARD-NIELSEN, H. U.; NOVIELLO, F.; NOVIKOV, D.; NOVIKOV, I.; OXBORROW, C. A.; PACI, F.; PAGANO, L.; PAJOT, F.; PALADINI, R.; PAOLETTI, D.; PARTRIDGE, B.; PASIAN, F.; PATANCHON, G.; PEARSON, T. J.; PERDEREAU, O.; PEROTTO, L.; PERROTTA, F.; PETTORINO, V.; PIACENTINI, F.; PIAT, M.; PIERPAOLI, E.; PIETROBON, D.; PLASZCZYNSKI, S.; POINTECOUTEAU, E.; POLENTA, G.; POPA, L.; PRATT, G. W.; Prézeau, G.; PRUNET, S.; PUGET, J. L.; RACHEN, J. P.; REACH, W. T.; REBOLO, R.; REINECKE, M.; REMAZEILLES, M.; RENAULT, C.; RENZI, A.; RISTORCELLI, I.; ROCHA, G.; ROSSET, C.; ROSSETTI, M.; ROUDIER, G.; D'ORFEUIL, B. R.; ROWAN-ROBINSON, M.; RUBIÑO-MARTÍN, J. A.; RUSHOLME, B.; SAID, N.; SALVATELLI, V.; SALVATI, L.; SANDRI, M.; SANTOS, D.; SAVELAINEN, M.; SAVINI, G.; SCOTT, D.; SEIFFERT, M. D.; SERRA, P.; SHELLARD, E. P. S.; SPENCER, L. D.; SPINELLI, M.; STOLYAROV, V.; STOMPOR, R.; SUDIWALA, R.; SUNYAEV, R.; SUTTON, D.; SUUR-USKI, A. S.; SYGNET, J. F.; TAUBER, J. A.; TERENCEZI, L.; TOFFOLATTI, L.; TOMASI, M.; TRISTRAM, M.; TROMBETTI, T.; TUCCI, M.; TUOVINEN, J.; TÜRLER, M.; UMANA, G.; VALENZIANO, L.; VALIVIITA, J.; TENT, F. V.; VIELVA, P.; VILLA, F.; WADE, L. A.; WANDEL, B. D.; WEHUS, I. K.; WHITE, M.; WHITE, S. D. M.; WILKINSON, A.; YVON, D.; ZACCHEI, A.; ZONCA, A. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. **Astronomy Astrophysics**, v. 594, p. A13, set. 2016. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016A&A...594A..13P>. Acesso em: 16 ago. 2023.

DARVISH, B.; MOBASHER, B.; SOBRAL, D.; RETTURA, A.; SCOVILLE, N.; FAISST, A.; CAPAK, P. The effects of the local environment and stellar mass on galaxy quenching to $z \sim 3$. *The American Astronomical Society*, v. 825, n. 2, p. 113, jul 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/113>. Acesso em: 16 ago. 2023.

DARVISH, B.; SCOVILLE, N. Z.; MARTIN, C.; MOBASHER, B.; DIAZ-SANTOS, T.; SHEN, L. Similar scaling relations for the gas content of galaxies across environments to $z \sim 3.5$. **The Astrophysical Journal**, The American Astronomical Society, v. 860, n. 2, p. 111, jun 2018. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aac836>. Acesso em: 16 ago. 2023.

DRESSLER, A. Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 236, p. 351–365, mar. 1980. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980ApJ...236..351D>. Acesso em: 16 ago. 2023.

DSS2. **NGC 821 - Elliptical Galaxy in Aries**. 2006. Disponível em: <https://theskylive.com/sky/deepsky/ngc821-object>. Acesso em: 16 ago. 2023.

EGGEN, O. J.; LYNDEN-BELL, D.; SANDAGE, A. R. Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. **The Astrophysical Journal**, v. 136, p. 748, nov. 1962. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1962ApJ...136..748E>. Acesso em: 16 ago. 2023.

ELLIS, R. The formation and evolution of galaxies. **Nature**, v. 385, n. 6701, p. A3, out. 1998. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998Natur.395A...3E>. Acesso em: 16 ago. 2023.

- ESA. **Merger stages of interacting galaxies**. ESA, 2008. Disponível em: <https://sci.esa.int/web/hubble/-/42637-merger-stages-of-interacting-galaxies>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- ESA, N. . **Hubble views NGC 4402**. NASA ESA, 2009. Disponível em: <https://esahubble.org/images/heic0911c/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- ESO. **Cosmic collapse**. ESO Supernova, 2017. Disponível em: <https://supernova.eso.org/exhibition/images/1016-galaxyformation/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- ESO, V. **Leo Triplet**. ESO, 2011. Disponível em: <https://www.eso.org/public/portugal/news/eso1126/>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- FERRERAS, I. **Fundamentals of Galaxy Dynamics, Formation and Evolution**. UCL Press, 2019. ISBN 9781911307624. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/j.ctv8jnzshq>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- GÓMEZ, P. L.; NICHOL, R. C.; MILLER, C. J.; BALOGH, M. L.; GOTO, T.; ZABLUDOFF, A. I.; ROMER, A. K.; BERNARDI, M.; SHETH, R.; HOPKINS, A. M.; CASTANDER, F. J.; CONNOLLY, A. J.; SCHNEIDER, D. P.; BRINKMANN, J.; LAMB, D. Q.; SUBBARAO, M.; YORK, D. G. Galaxy star formation as a function of environment in the early data release of the sloan digital sky survey*. **The Astrophysical Journal**, v. 584, n. 1, p. 210, Feb 2003. ISSN 0004-637X. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/345593>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- HECKMAN, T. M.; PTAK, A.; HORNSCHEMEIER, A.; KAUFFMANN, G. The relationship of hard x-ray and optical line emission in low-redshift active galactic nuclei. **The Astrophysical Journal**, v. 634, n. 1, p. 161–168, nov. 2005. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...634..161H>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- HETHERINGTON, N. S. The Shapley-Curtis Debate. **Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 10, n. 490, p. 313–320, abr. 1970. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1970ASPL...10..313H>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- HOOPEES, C. G.; HECKMAN, T. M.; SALIM, S.; SEIBERT, M.; TREMONTI, C. A.; SCHIMINOVICH, D.; RICH, R. M.; MARTIN, D. C.; CHARLOT, S.; KAUFFMANN, G.; FORSTER, K.; FRIEDMAN, P. G.; MORRISSEY, P.; NEFF, S. G.; SMALL, T.; WYDER, T. K.; BIANCHI, L.; DONAS, J.; LEE, Y.-W.; MADORE, B. F.; MILLIARD, B.; SZALAY, A. S.; WELSH, B. Y.; YI, S. K. The diverse properties of the most ultraviolet-luminous galaxies discovered by galex. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, The American Astronomical Society, v. 173, n. 2, p. 441, dec 2007. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1086/516644>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- HOUGHTON, R. Revisiting the original morphology-density relation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 451, n. 4, p. 3427–3436, ago. 2015. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015MNRAS.451.3427H>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- HUBBLE, E. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 15, p. 168–173, 1929.
- HUBBLE, E. **Realm of the Nebulae**. New Haven: Yale University Press, 1936. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1936rene.book.....H>. Acesso em: 16 ago. 2023.

- JONES, M. H.; LAMBOURNE, R. J. (Ed.). **An Introduction to Galaxies and Cosmology**. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2004.
- KRONBERGER, T.; Kapferer, W.; Ferrari, C.; Unterguggenberger, S.; Schindler, S. On the influence of ram-pressure stripping on the star formation of simulated spiral galaxies. **A&A**, v. 481, n. 2, p. 337–343, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20078904>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- KWON, Y.; NUNLEY, D.; GARDNER, J.; BALAZINSKA, M.; HOWE, B.; LOEBMAN, S. Scalable clustering algorithm for n-body simulations in a shared-nothing cluster. In: . [S. l.: s. n.], 2010. v. 6187, p. 132–150. ISBN 978-3-642-13817-1.
- LACEY, C.; COLE, S. Merger rates in hierarchical models of galaxy formation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 262, n. 3, p. 627–649, 1993.
- LARSON, R. B. Numerical calculations of the dynamics of collapsing proto-star. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 145, p. 271, jan. 1969. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1969MNRAS.145..271L>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- LARSON, R. B.; TINSLEY, B. M.; CALDWELL, C. N. The evolution of disk galaxies and the origin of s0 galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 237, p. 692–707, maio 1980. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980ApJ...237..692L>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- MADAU, P.; DICKINSON, M. Cosmic star-formation history. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, Annual Reviews, v. 52, n. 1, p. 415–486, aug 2014.
- MCCARTHY, I. G.; FRENK, C. S.; FONT, A. S.; LACEY, C. G.; BOWER, R. G.; MITCHELL, N. L.; BALOGH, M. L.; THEUNS, T. Ram pressure stripping the hot gaseous haloes of galaxies in groups and clusters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 383, n. 2, p. 593–605, 12 2007. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12577.x>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- MO, H.; VAN DEN BOSCH, F.; WHITE, S. **Galaxy Formation and Evolution**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-511-72962-1.
- PRESS, W. H.; DAVIS, M. How to identify and weigh virialized clusters of galaxies in a complete redshift catalog. **The Astrophysical Journal**, v. 259, p. 449–473, ago. 1982. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1982ApJ...259..449P>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- SANTANA-SILVA, L.; GONÇALVES, T. S.; BASU-ZYCH, A.; SOARES-SANTOS, M.; MENÉNDIZ-DELMESTRE, K.; DRLICA-WAGNER, A.; RIGUCCINI, L.; KUROPATKIN, N. P.; YANNY, B.; EUFRASIO, R. T. The environment of Lyman break analogues (ELBA) survey: star-forming galaxies in small groups. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 498, n. 4, p. 5183–5193, 09 2020. ISSN 0035-8711. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2757>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- SCHNEIDER, P. **Extragalactic astronomy and cosmology**. 2. ed. Berlin, Germany: Springer, 2014.

SDSS. **Hubble Captures a "Five-Star"Rated Gravitational Lens**. NASA, 2006. Disponível em: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2006/23/1929-Image.html>. Acesso em: 16 ago. 2023.

SPINRAD, H. **Galaxy Formation and Evolution**. 1. ed. [S. l.]: Springer; Pulished in association with Praxis Pub, 2005. (Springer-Praxis books in astrophysics and astronomy). ISBN 9783540254980; 3540254986.

ZOONIVERSE. **Hubble sequence**. ESO Supernova, 2023. Disponível em: https://supernova.eso.org/exhibition/images/1015_fork-1920/. Acesso em: 16 ago. 2023.