



Observatório
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MECANISMOS DE EXCITAÇÃO DO GÁS EM LINERS: UMA PERSPECTIVA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO

RAQUEL SILVA FREITAS

RIO DE JANEIRO

2025

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Observatório Nacional

Programa de Pós-Graduação

Dissertação de Mestrado

MECANISMOS DE EXCITAÇÃO DO GÁS EM LINERS: UMA PERSPECTIVA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO

por

Raquel Silva Freitas

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Astronomia.

Orientador: Dr. Alberto Rodríguez Ardila

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Setembro de 2025

S837

Silva Freitas, Raquel

Mecanismos de Excitação do Gás em LINERs: Uma
Perspectiva no Infravermelho Próximo [Rio de Janeiro] 2025.
xvi, 124 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Dissertação (mestrado) - Observatório Nacional - Rio de
Janeiro, 2025.

1. LINERs. 2. Excitação do gás. 3. Infravermelho
próximo. 4. Diagramas de diagnóstico. I. Observatório
Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“MECANISMOS DE EXCITAÇÃO DO GÁS EM LINERS: UMA PERSPECTIVA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO”

RAQUEL SILVA FREITAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dr. Alberto Rodríguez Ardila – Observatório Nacional
(Orientador)

Dr. Rogério Riffel – Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dr. Rogério Monteiro Oliveira – Observatório Nacional

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

8 DE SETEMBRO DE 2025

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo apoio espiritual que me concedeu durante esses dois anos. Só Ele e eu sabemos o quanto foi difícil realizar toda essa caminhada. Em meio às dificuldades, o Senhor me sustentou. Deus! Agradeço por ser meu norte e por me ajudar a passar pelas adversidades.

À minha família, minha base em todos os momentos. Aos meus pais, Maria Eunice e Irineu Macedo, por todo o amor, apoio e incentivo constantes. À minha irmã Rebeca Freitas e à Elis, que considero como parte da minha família, minha gratidão por sempre estarem ao meu lado, oferecendo força, consolo e alegria. Sem vocês, eu não teria chegado até aqui.

E às minhas “filhas” peludinhas, Kyra e Lincy: meu amor e minha companhia diária. Nos dias difíceis, vocês foram meu incentivo e motivação para continuar. Obrigada por existirem e fazerem parte dessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alberto Rodríguez Ardila, agradeço pela orientação dedicada, pela confiança no meu trabalho e pelo incentivo constante ao longo da pesquisa. Sua paciência e comprometimento foram essenciais para este resultado.

Aos meus antigos orientadores, Prof. Dr. Paulo Poppe e Profa. Dra. Vera Martin, deixo meu sincero agradecimento. Mesmo não estando mais diretamente envolvidos na minha orientação, continuam presentes com apoio, conselhos e generosidade. Sou muito grata pela atenção e incentivo que sempre me ofereceram.

Aos amigos Biel, Cloves, Nick, Alana, Karen e Iza: obrigada pela amizade verdadeira, pelo apoio constante e pelos momentos de leveza que tornaram essa trajetória mais feliz e suportável.

Aos colegas do Observatório Nacional, deixo meu carinho e sincero reconhecimento. Obrigada por cada conversa, ajuda, troca de ideias e risadas que tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora. Em especial, agradeço ao Patrick, Ícaro, Toninho, Alessandro, Maria Eduarda e, claro, ao Bernardo — não menos especial por vir por último! Meu querido amigo e colega de apartamento, obrigada por me aguentar desde o início, pelas ajudas do dia a dia e pelas fofocas sempre pontuais, que garantiram boas risadas e a manutenção da sanidade.

Aos amigos que fiz no IAG/USP (graças a Elis), obrigada pela acolhida tão generosa e pelos momentos compartilhados. Em especial à Yasmin, Laís, Thaysa e Claudio — a

presença e amizade de vocês tornaram essa experiência muito mais leve e significativa.

Ao grupo de pesquisa do qual faço parte, formado por Denimara, Bárbara, Matheus, Vinícius, Marcos, Panda, Murilo e Gabriel, meu sincero reconhecimento. É uma honra compartilhar aprendizados e desafios com vocês.

Agradeço também a todos os professores e colegas que cruzaram meu caminho durante o mestrado. Cada um, à sua maneira, contribuiu para a construção deste trabalho.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro, que possibilitou minha dedicação integral ao mestrado.

MECANISMOS DE EXCITAÇÃO DO GÁS EM LINERS: UMA PERSPECTIVA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO

RESUMO

As regiões nucleares de baixa ionização (LINERs) apresentam ambiguidades quanto aos mecanismos de excitação do gás, frequentemente compartilhando características com núcleos ativos clássicos. Neste trabalho, foram propostos e aplicados diagramas de diagnóstico no infravermelho próximo (NIR) para caracterizar, pela primeira vez, uma amostra local de LINERs. O objetivo principal foi identificar o mecanismo dominante de ionização em 47 galáxias ativas observadas com o espectrógrafo GNIRS no telescópio Gemini Norte. A síntese espectral foi realizada com o `Starlight` e o ajuste das linhas de emissão com a biblioteca `Pyspeckit`, permitindo obter fluxos, razões de linhas e estimativas de avermelhamento interestelar. Foram utilizadas combinações de razões sensíveis a diferentes mecanismos, como $H2\ 2.122\mu\text{m}/Br\gamma$, $[Fe,II]\ 1.257\mu\text{m}/Pa\beta$, $[C,I]/Pa\beta$ e $[S,III]/Pa\gamma$. A aplicação do diagrama $Fe2H2$ mostrou que, entre as galáxias para as quais foi possível medir todas as linhas necessárias, mais da metade (cerca de 53%) ocupa a região típica de LINERs. Quatro galáxias previamente classificadas como Seyfert foram reclassificadas como LINERs no NIR, evidenciando o potencial dessa faixa espectral para refinar classificações em ambientes obscurecidos. A comparação com outros diagramas no NIR revelou que os LINERs se concentram em regiões compatíveis com excitação por AGNs de baixa luminosidade, e não por choques. Também foi investigado o avermelhamento interestelar a partir das razões $Pa\beta/Br\gamma$ e $[Fe,II]\ 1.257/1.644\mu\text{m}$, constatando-se que, em geral, $E(B - V)[Fe,II]$ é igual ou inferior ao obtido com linhas de hidrogênio. No entanto, como a linha $Br\gamma$ é fraca e de difícil detecção na maioria dos objetos, especialmente em LINERs, essa tendência deve ser confirmada com dados de melhor relação sinal-ruído. Ainda assim, o resultado sugere que a emissão de $[Fe,II]$ provém de regiões mais externas e menos obscurecidas, predominantemente fotoionizadas pela fonte central. Por fim, foi detectada uma fração significativa de LINERs Tipo 1 (com componentes largas em $Pa\beta$, $Pa\gamma$ e principalmente $He\ I$), reforçando o cenário de AGNs fracos com BLR detectável. Este estudo demonstra que os diagnósticos NIR são ferramentas eficazes para refinar classificações e investigar a estrutura física de núcleos ativos obscurecidos.

MECANISMOS DE EXCITAÇÃO DO GÁS EM LINERS: UMA PERSPECTIVA NO
 INFRAVERMELHO PRÓXIMO

RESUMO

Low-Ionization Nuclear Emission-line Regions (LINERs) show ambiguities regarding the gas excitation mechanisms, often sharing characteristics with classical active galactic nuclei (AGNs). In this work, we proposed and applied near-infrared (NIR) diagnostic diagrams to characterize, for the first time, a local sample of LINERs. The main goal was to identify the dominant ionization mechanism in 47 active galaxies observed with the GNIRS spectrograph on the Gemini North telescope. Spectral synthesis was performed with `Starlight`, and emission line fitting was carried out with the `Pyspeckit` package, providing fluxes, line ratios, and estimates of interstellar reddening. We used combinations of line ratios sensitive to different mechanisms, such as $\text{H2 } 2.122\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$, $[\text{Fe,II}] 1.257\mu\text{m}/\text{Pa}\beta$, $[\text{C,I}]/\text{Pa}\beta$, and $[\text{S,III}]/\text{Pa}\gamma$. The application of the Fe2H2 diagram showed that, among the galaxies for which all required lines were measurable, more than half (about 53%) fall within the typical LINER region. Four galaxies previously classified as Seyfert were reclassified as LINERs in the NIR, highlighting the potential of this spectral range to refine classifications in obscured environments. The comparison with other NIR diagnostic diagrams revealed that LINERs are concentrated in regions compatible with excitation by low-luminosity AGNs rather than by shocks. We also investigated interstellar reddening from $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ and $[\text{Fe,II}] 1.257/1.644\mu\text{m}$ ratios, finding that, in general, $E(B - V)[\text{Fe,II}]$ is equal to or lower than the value obtained from hydrogen lines. However, since $\text{Br}\gamma$ is weak and difficult to detect in most objects—especially in LINERs—this trend must be confirmed with higher signal-to-noise data. Nevertheless, it suggests that $[\text{Fe,II}]$ emission arises from more external and less obscured regions, predominantly photoionized by the central source. Finally, we detected a significant fraction of Type 1 LINERs (with broad components in $\text{Pa}\beta$, $\text{Pa}\gamma$, and especially He I), supporting the scenario of weak AGNs with a detectable BLR. This study demonstrates that NIR diagnostics are effective tools to refine classifications and investigate the physical structure of obscured active nuclei.

Lista de Figuras

1.1	Contínuo típico de AGNs.	4
1.2	Esquema ilustrativo do modelo unificado	7
1.3	Esquema moderno do ambiente circumnuclear em AGNs	9
1.4	Imagens e espectros no infravermelho próximo	13
1.5	Classificação de galáxias no diagrama BPT	15
1.6	Curvas de extinção interestelar normalizadas	18
2.1	Ópticas e mecanismos do GNIRS dentro da estrutura do instrumento. O trajeto azul indica o sensor de frente de onda (<i>On-Instrument Wave-Front Sensor</i> , OIWFS); o trajeto vermelho mostra o feixe científico utilizado no espectrógrafo. Disponível em https://www.gemini.edu/instrumentation/gnirs	25
2.2	Esquema óptico do espectrógrafo GNIRS	26
2.3	Regiões telúricas na galáxia NGC 2273	28
2.4	Regiões espectrais associadas às bandas moleculares de CN e CO	30
2.5	Exemplos de espectros das bases	33
2.6	Exemplo de aplicação de máscaras	35
2.7	Curvas representativas do contínuo não estelar (FC)	37
2.8	Distribuições espectrais de energia para corpos negros	37
2.9	Exemplo da síntese espectral	40
2.10	Resultado da síntese espectral com a base estelar E-MILES	42
2.11	Resultado da síntese espectral com a base estelar E-MILES	44
2.12	Ajustes de componentes gaussianas	46
2.13	Ajuste espectral da região	47
3.1	Espectros no infravermelho próximo de seis galáxias da amostra	52
3.2	Exemplos de espectros NIR de três galáxias da amostra	55
3.3	Diagrama diagnóstico Fe2H2	57
3.4	Diagrama diagnóstico Fe2H2 alternativo	58
3.5	Diagramas CIS3 no NIR	61
3.6	Diagramas Fe2S3- β no NIR	62

3.7	Diagramas P2S3 no NIR	63
3.8	Diagrama de comparação entre os valores de extinção $E(B - V)$	68
4.1	Espectros da galáxia NGC 1052	74
4.2	Ajustes multi-componentes das linhas de emissão na galáxia NGC 1052. . .	75
4.3	SED das galáxias NGC 1052 e NGC 7469	76
4.4	Espectros da galáxia NGC 3998.	77
4.5	Ajuste espectral das linhas largas da NGC 3998	78
4.6	SED das galáxias NGC 3998 e NGC 7469.	79
4.7	Espectros ópticos e infravermelhos da galáxia NGC 4203	80
4.8	Ajustes multicomponentes de regiões espectrais da galáxia NGC 4203 . . .	81
4.9	Comparação entre as SEDs da NGC 4203 e da NGC 7469	82
4.10	Espectros da galáxia NGC 4258.	84
4.11	Ajustes espectrais de linhas de emissão largas em NGC 4258	84
4.12	SED da galáxia NGC 4258, comparada com a SED da Seyfert Tipo 1 NGC 7469.	85
4.13	Espectros da galáxia NGC 4450	87
4.14	Ajuste multicomponente da NGC 4450	88
4.15	Comparação entre as SEDs da NGC4450 e da NGC7469	88
4.16	Espectros da galáxia NGC 3031	89
4.17	Ajustes das linhas da galáxia NGC 3031	90
4.18	Comparação entre as SEDs da NGC 3031 e da NGC 7469	91

Lista de Tabelas

2.1	Amostra de galáxias	24
2.2	Comparação entre as bases	34
2.3	Relação entre expoentes da componente FC	36
2.4	Parâmetros para o <code>grid.in</code>	38
3.1	Fluxos de emissão das linhas espectrais para a amostra de galáxias deste trabalho.	53
3.2	Fluxos de emissão das linhas espectrais para a amostra de galáxias deste trabalho.	54
3.3	Coefficientes para as curvas teóricas dos diagramas de diagnósticos propostos por Calabrò <i>et al.</i> (2023), como definido pela Equação 3.1	60
3.4	Valores de avermelhamento $E(B - V)$ calculados a partir das razões $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ e $[\text{Fe II}] 1.257 \mu\text{m} / 1.644 \mu\text{m}$, com seus respectivos erros.	66
4.1	FWHM e velocidades para linhas largas.	92

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Núcleos Galácticos Ativos	2
1.1.1 O Modelo Unificado dos AGNs	5
1.2 LINERs e a Excitação do Gás no Infravermelho Próximo	14
1.2.1 Definição e características dos LINERs	14
1.2.2 Principais mecanismos de excitação	17
1.2.3 Importância do estudo no infravermelho próximo	18
1.2.4 Diagramas de diagnóstico no infravermelho próximo	19
1.3 Objetivos	20
2 Obtenção e Processamento dos Dados	23
2.1 Amostra, Aquisição de Dados e Redução	23
2.1.1 Definição da amostra	23
2.1.2 Observações e instrumentação	25
2.1.3 Redução e preparação dos espectros	26
2.2 Especificidades de espectros no NIR	27
2.2.1 Impacto das regiões telúricas na observação em NIR	27
2.2.2 Absorções no contínuo estelar	29
2.3 Ajuste da População Estelar	31
2.3.1 Por que realizar a síntese estelar?	31
2.3.2 Procedimentos para subtração do contínuo estelar	31
2.3.3 Execução do código	38
2.3.4 Ajuste da população estelar com a base E-MILES	40
2.3.5 Ajuste da população estelar com a base XSL	43
2.4 Ajuste de Linhas de Emissão com PYSPECKIT	45
2.4.1 Preparação dos espectros e definição do ajuste	45
2.4.2 Estimativas iniciais e critérios para múltiplas componentes	45
2.4.3 Imposição de Vínculos Físicos: o argumento <code>tied</code>	47

2.4.4	Estimativa de limite superior e erro do fluxo	48
3	Resultados	51
3.1	Espectros NIR e Principais Linhas de Emissão	51
3.1.1	Fluxo das linhas de emissão	53
3.1.2	Galáxias sem Linhas em Emissão Detectáveis na Amostra	54
3.2	Diagramas de Diagnóstico	55
3.2.1	Classificação dos mecanismos de excitação	55
3.2.1.1	Versão Alternativa do Diagrama Fe2H2	57
3.2.2	Investigando a distribuição de LINERs em outros diagramas de diagnóstico no NIR	59
3.3	Avermelhamento	65
3.3.1	Quantificação e Comparação do Avermelhamento	66
3.3.2	As Linhas de [FeII] como Indicadores de Extinção	69
4	LINERs Tipo 1	71
4.1	Características Espectrais	71
4.2	Identificação de LINERs Tipo 1 em Nossa Amostra	72
4.2.1	Análise detalhada dos objetos LINER Tipo 1	73
4.3	Velocidade do gás na BLR	91
5	Conclusões e Perspectivas	95
	Referências Bibliográficas	99
A	Espectros	117

Capítulo 1

Introdução

A compreensão da evolução das galáxias está intimamente ligada à atividade em seus núcleos. Atualmente, há evidências robustas de que praticamente todas as galáxias massivas abrigam em seus centros buracos negros supermassivos (SMBHs, do inglês *Supermassive black holes*), com massas entre 10^6 e $10^{10} M_{\odot}$ (Ferrarese e Merritt, 2000; Gebhardt *et al.*, 2000; Kormendy e Ho, 2013a). Embora em muitos casos esses objetos estejam em estado quiescente, há situações em que o SMBH se encontra em fase ativa de acreção, dando origem aos chamados Núcleos Galácticos Ativos (AGNs, do inglês *Active Galactic Nuclei*). Os AGNs estão entre os fenômenos mais energéticos do Universo, emitindo radiação desde o rádio até os raios gama, frequentemente com luminosidades que superam em várias ordens de grandeza a da galáxia hospedeira (Ho, 2008). Essa intensa emissão é resultado da conversão de energia potencial gravitacional em radiação, durante o processo de acreção de matéria por um SMBH, e pode vir acompanhada da produção de *outflows*, ventos e jatos relativísticos.

A relação entre SMBHs e suas galáxias hospedeiras tem sido objeto de intensos estudos observacionais e teóricos. Correlações como a relação $M_{BH} - \sigma$, que vincula a massa do buraco negro à dispersão de velocidades do bojo galáctico (Ferrarese e Merritt, 2000; Gebhardt *et al.*, 2000; Kormendy e Ho, 2013b), sugerem que a evolução do SMBH e da galáxia ocorre de forma interdependente. Isso implica que os processos de alimentação e retroalimentação (feedback) nuclear desempenham papel central na evolução das galáxias. AGNs podem, por exemplo, inibir a formação estelar ao aquecer ou expelir o gás interestelar, impactando diretamente a evolução morfológica e espectral da galáxia (Fabian, 2012).

Dentre os diversos tipos de AGNs, os LINERs (do inglês, *Low-Ionization Nuclear Emission-line Regions*) representam uma classe particularmente enigmática. Caracterizados por linhas de emissão dominadas por espécies de baixa ionização (Heckman, 1980), os LINERs estão presentes em uma fração significativa das galáxias locais, mas ainda não há consenso sobre o mecanismo dominante de excitação responsável por sua emissão espectral. As hipóteses variam desde a presença de um AGN de baixa luminosidade

até processos alternativos, como choques ou ionização por populações estelares antigas, especialmente estrelas pós-AGB e remanescentes estelares quentes (Ho, 2008). Nesse contexto, entender a natureza dos LINERs é fundamental para compreender a diversidade dos fenômenos associados à atividade nuclear em galáxias. O regime do infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near-infrared*) oferece uma janela privilegiada para o estudo da atividade nuclear obscurecida, dado que o comprimento de onda maior permite atravessar regiões altamente empoeiradas que ocultam os núcleos em observações ópticas. Linhas como [Fe II] $1.257 \mu\text{m}$ e Pa β $1.282 \mu\text{m}$, por exemplo, são particularmente úteis para distinguir entre excitação fotoionizante e choques, oferecendo diagnósticos alternativos aos tradicionais diagramas ópticos (Baldwin *et al.*, 1981). Além disso, a crescente disponibilidade de espectroscopia NIR com alta resolução espacial e espectral, graças a instrumentos como o *James Webb Space Telescope* (JWST/NIRSpec), o *Extremely Large Telescope* (ELT/MOSAIC) e o *Giant Magellan Telescope* (GMT/NIRS), abre novas possibilidades para a caracterização detalhada de LINERs e AGNs obscurecidos.

Este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades espectrais de LINERs no infravermelho próximo, com base nos dados de Mason *et al.* (2015) – mais detalhes em §2.1.1 –, buscando elucidar os processos físicos que regem esse tipo de núcleo galáctico. A análise aqui desenvolvida visa oferecer subsídios para a construção de uma nova perspectiva sobre LINERs, especialmente em um cenário no qual o acesso ao NIR se torna cada vez mais relevante com o advento de telescópios como o JWST. Em tempos em que os modelos cosmológicos e a astrofísica extragaláctica buscam integrar de forma mais robusta os efeitos de *feedback* na evolução galáctica, compreender o papel dos LINERs como potenciais agentes de realimentação em galáxias massivas adquire importância estratégica. Além de possivelmente representarem a fase final ou mais “adormecida” da atividade nuclear, os LINERs podem também atuar como ambientes onde ventos fracos e *outflows* suaves influenciam lentamente a dinâmica e a composição química do meio interestelar central (Cheung *et al.*, 2016; Sarzi *et al.*, 2006).

Este capítulo apresenta o contexto da atividade nuclear em galáxias, com foco nos AGNs e nas particularidades dos LINERs, além de delinear os objetivos deste trabalho. A Seção 1.1 aborda os AGNs, destacando sua classificação, mecanismos físicos e o Modelo Unificado. A Seção 1.2 trata dos LINERs, discutindo sua definição, possíveis mecanismos de excitação e as vantagens de seu estudo no infravermelho próximo. Por fim, a Seção 1.3 expõe os objetivos da pesquisa e suas contribuições para o entendimento da atividade nuclear de baixa luminosidade.

1.1 Núcleos Galácticos Ativos

A história dos núcleos galácticos ativos remonta ao início do século XX, quando Fath (1909) descobriu linhas de emissão fortes e largas na galáxia NGC 1068. Contudo, foi

apenas em 1943, com o trabalho sistemático de Seyfert (1943), que se reconheceu a existência de uma classe distinta de galáxias com centros energeticamente ativos. Seyfert observou que esses objetos apresentavam linhas de emissão de alta excitação sobrepostas a espectros estelares típicos, sugerindo a presença de uma fonte adicional de energia nos núcleos galácticos. Na década de 1950, Woltjer (1959) argumentou que o tamanho angular compacto das galáxias Seyfert implicava uma região emissora com raio inferior a 100 pc. Assumindo que o gás estivesse ligado gravitacionalmente à massa central, isso exigiria uma massa central da ordem de $10^{10} M_{\odot}$, valor incompatível com fontes estelares convencionais. Pouco tempo depois, Hoyle e Fowler (1963) propuseram que a energia dos AGNs poderia provir da liberação gravitacional em torno de um objeto estelar extremamente massivo, hipótese refinada por Salpeter (1964), que identificou esse objeto como um buraco negro supermassivo.

Desde então, observações em múltiplos comprimentos de onda revelaram que AGNs emitem radiação em todo o espectro eletromagnético – do rádio aos raios gama – a partir de uma região extremamente compacta. Essa distribuição espectral de energia (SED, do inglês *Spectral Energy Distribution*) é uma das marcas observacionais dos AGNs, apresentada na Figura 1.1. Uma característica notável no SED dos AGNs mais luminosos é a presença do chamado “*big blue bump*” ou “bump azul”, um excesso de emissão no ultravioleta geralmente atribuído à radiação térmica proveniente de um disco de acreção fino e radiativamente eficiente ao redor do SMBH.

No entanto, essa estrutura tende a se enfraquecer em AGNs de baixa luminosidade, como os LINERs, embora observações de alta resolução revelem que alguns ainda mantêm emissão significativa no ultravioleta (Maoz, 2007). Nesses casos, acredita-se que o fluxo de matéria ocorra por meio de um RIAF (do inglês *Radiatively Inefficient Accretion Flow*). Um caso particular desse modelo é o ADAF (do inglês *Advection-Dominated Accretion Flow*), no qual a maior parte da energia liberada pela acreção não é irradiada, mas transportada para o buraco negro na forma de entalpia (Maoz, 2007; Younes *et al.*, 2012). Esses fluxos são caracterizados por baixa eficiência radiativa, temperaturas elevadas e densidades reduzidas, o que resulta em emissão contínua fraca e espectros dominados por linhas de baixa ionização (Ho, 2008; Narayan e Yi, 1995). Ainda há debate se a emissão nos raios X de LINERs é dominada por um RIAF ou por emissão de jatos relativísticos, com resultados observacionais sustentando ambos os cenários (Younes *et al.*, 2012).

Uma das divisões mais relevantes entre os AGNs diz respeito à intensidade de sua emissão em rádio. Cerca de 10% dos AGNs são classificados como *radio-loud* (Padovani, 2017), ou seja, apresentam emissão de rádio significativamente mais intensa, muitas vezes associada à presença de jatos relativísticos colimados. Os demais, denominados *radio-quiet*, exibem emissão de rádio muito mais fraca, mesmo possuindo discos de acreção brilhantes. Essa distinção não implica ausência total de emissão em rádio nos *radio-quiet*, mas sim uma emissão que é desproporcionalmente menor em relação ao contínuo

óptico (Wilson e Colbert, 1995). A origem dessa diferença ainda é objeto de debate, podendo estar relacionada a fatores como o spin do buraco negro, a taxa de acreção e as propriedades do campo magnético no núcleo ativo.

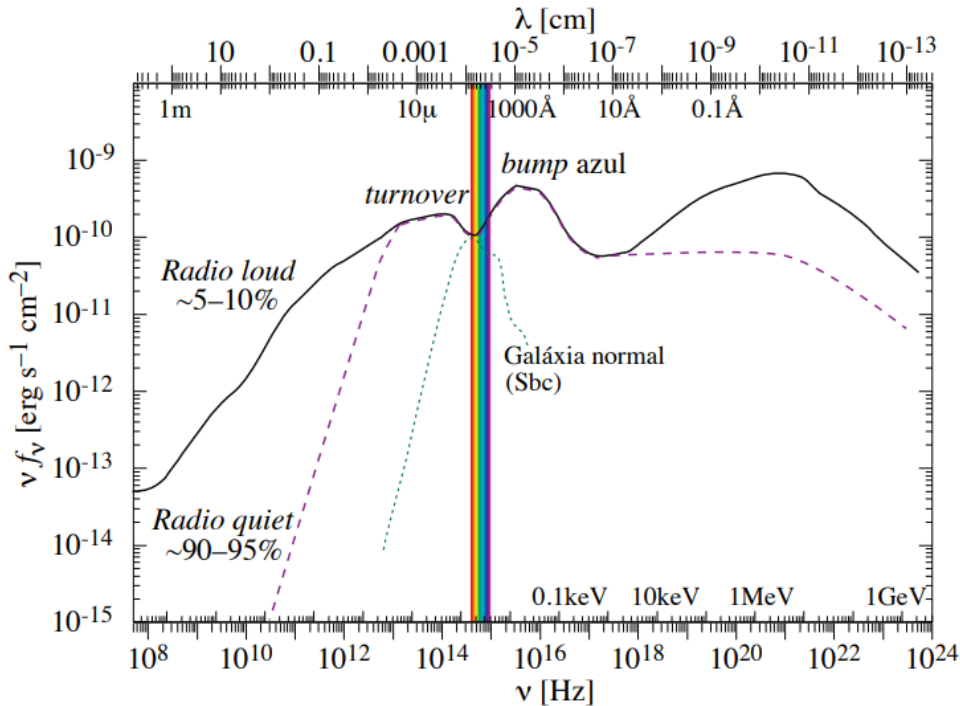


Figura 1.1: Contínuo típico de AGNs. Os traços contínuo e tracejado representam as “radio-louds” e as “radio-quiets”, respectivamente. Em pontilhado, o contínuo típico de uma galáxia normal (tipo Sbc). Imagem presente nas Notas de Aula "Astronomia Extragaláctica e Cosmologia" do Prof. Dr. Gastão Bierrenbach Lima Neto, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP). Adaptado de Peterson (1997).

Do ponto de vista observacional, as principais propriedades dos AGNs incluem (Beckmann e Shrader, 2012):

1. Linhas de emissão largas, com larguras à meia altura (FWHM, do inglês *Full Width Half Maximum*) superiores a 1000 km s^{-1} , associadas à alta dispersão de velocidades do gás na região em torno do SMBH, refletindo os movimentos rápidos das nuvens que compõem a BLR;
2. Linhas de emissão estreitas, frequentemente proibidas e não variáveis, provenientes de regiões ionizadas mais distantes;
3. Luminosidades bolométricas que podem ultrapassar $10^{15} L_{\odot}$;
4. Variabilidade em escalas que, em geral, são da ordem de meses ou anos (porém alguns AGNs podem apresentar variações de dias ou até mesmo minutos) tanto no contínuo quanto nas linhas de emissão;

5. Emissão intensa em raios X e, em uma fração dos AGNs, em raios gama, geralmente com rápida variabilidade, o que restringe o tamanho das regiões emissoras a escalas sub-parsec;
6. Presença de jatos relativísticos, observados principalmente em rádio, que se estendem de milésimos de parsec até centenas de kiloparsecs.

Além de suas propriedades radiativas e estruturais, os AGNs desempenham um papel crucial na evolução das galáxias hospedeiras. Ventos nucleares, outflows relativísticos e radiação intensa provenientes do AGN podem aquecer, ionizar ou remover o gás interestelar, inibindo a formação estelar ou mesmo expulsando material da galáxia (Fabian, 2012; King e Pounds, 2015). Tal mecanismo é considerado essencial para explicar o esgotamento do gás em galáxias massivas e a transição de galáxias azuis formadoras de estrelas para sistemas elípticos vermelhos e passivos.

Do ponto de vista físico, a fonte de energia dos AGNs é a acreção de matéria pelo SMBH, em um processo altamente eficiente na conversão de massa em energia. O gás, ao se aproximar do SMBH, forma um disco de acreção viscoso onde parte da energia gravitacional é convertida em radiação, principalmente nas faixas do óptico ao ultravioleta. Acima do disco, acredita-se que exista uma região quente de elétrons relativísticos, conhecida como corona, responsável pela emissão em raios X via espalhamento Compton inverso — processo no qual fótons de baixa energia (como no UV) ganham energia ao colidirem com elétrons relativísticos, sendo reemitidos como fótons de maior energia (raios X; Haardt e Maraschi 1991, 1993). Esse cenário é sustentado pelas observações espectrais e variabilidade em múltiplas bandas, e oferece uma estrutura unificada para explicar a emissão contínua observada nos AGNs, incluindo o *big blue bump* no UV e o excesso de raios X duros frequentemente detectado.

Finalmente, os AGNs se dividem em diversas subclasses, como Seyferts, rádio-galáxias, blazares e quasares, que diferem em aspectos como luminosidade, presença ou ausência de jatos, e características espectrais. Os quasares, por exemplo, são AGNs extremamente luminosos e frequentemente situados a altos redshifts, com espectros dominados por linhas de emissão largas e intensas. Já os blazares exibem forte variabilidade e são dominados por emissão não térmica altamente colimada — fenômeno atribuído à observação quase ao longo do eixo do jato. Essa diversidade observacional motivou a proposta do **modelo unificado** dos AGNs, que busca explicar as diferentes classes por meio de um único cenário geométrico, considerando orientação da linha de visada, presença de estruturas toroidais de poeira e jatos relativísticos. Esse modelo será discutido a seguir.

1.1.1 O Modelo Unificado dos AGNs

Ao longo das décadas de 1980 e 1990, observações de núcleos galácticos ativos revelaram uma grande diversidade morfológica e espectral — como diferenças na largura

das linhas de emissão, presença ou ausência de jatos relativísticos, graus de polarização e emissão em rádio. Inicialmente, essas variações levaram a classificações distintas para o que, na essência, era o mesmo fenômeno físico: a atividade nuclear galáctica. Para reconciliar essa diversidade, e impulsionado por observações cruciais, como a detecção de linhas de emissão largas em AGNs de Tipo 2¹ quando observados em luz polarizada (o que indicava a presença de uma região de linha larga obscurecida), surgiu o modelo unificado dos AGNs (Antonucci e Miller, 1985; Urry e Padovani, 1995). A premissa desse modelo é que todos os AGNs compartilham a mesma estrutura básica, sendo as diferenças observacionais explicadas majoritariamente por efeitos de orientação da linha de visada do observador e por parâmetros físicos como a taxa de acreção e a presença de jatos.

Segundo esse modelo, o núcleo ativo de uma galáxia é composto pelos seguintes elementos fundamentais:

- **Buraco negro supermassivo:** situado no centro da galáxia, com massas que variam entre 10^6 e $10^{10} M_{\odot}$, é a fonte primária de energia. A intensa gravidade atrai material ao seu redor, possibilitando a formação de outras estruturas (Osterbrock e Ferland, 2006a).
- **Disco de acreção:** é uma estrutura achatada de gás em rotação ao redor do SMBH. À medida que a matéria espirala para dentro, sua energia potencial gravitacional é convertida em radiação, principalmente no contínuo óptico e ultravioleta. Esse processo também fornece fótons energéticos responsáveis pela ionização do gás em regiões próximas (Netzer, 2013).
- **Plasma de elétrons quente (corona):** localizado acima e abaixo do disco, é responsável por processos de espalhamento Compton, que contribuem para a emissão em raios X.
- **Região de Linhas Largas (BLR):** composta por nuvens de gás denso em órbita rápida próxima ao SMBH, produz linhas de emissão alargadas principalmente por efeito Doppler. Essas nuvens são diretamente iluminadas pelo contínuo do disco de acreção. O tamanho típico da BLR varia entre aproximadamente 0,01 e 1 parsec, dependendo da luminosidade do AGN, conforme evidenciado por estudos de mapeamento de reverberação (Bentz *et al.*, 2009, 2013; Kaspi *et al.*, 2005). A densidade do gás na BLR é elevada, geralmente na faixa de $n_e \sim 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.
- **Toro de poeira e gás (torus):** estrutura toroidal espessa e opaca que envolve o disco de acreção e a BLR. Sua principal função no modelo unificado é modular a visibilidade do núcleo ativo. Quando a linha de visada atravessa o torus, o observador não enxerga diretamente a BLR e o disco de acreção, caracterizando um AGN

¹Galáxias que apresentam apenas linhas de emissão estreita.

do tipo 2. Quando o torus está fora da linha de visada, a BLR se torna visível, caracterizando um AGN do tipo 1 (Netzer, 2013).

- **Região de Linhas Estreitas (NLR):** situada a distâncias maiores do núcleo ativo, geralmente entre 10 e 1000 parsecs, a NLR é composta por gás menos denso e mais estendido, produzindo linhas de emissão estreitas devido a menores velocidades Doppler. Mesmo que o núcleo esteja obscuro, a NLR pode ser observada, pois está fora das regiões fortemente empoeiradas. A densidade típica do gás na NLR é da ordem de $n_e \sim 10^2 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$.
- **Jatos relativísticos:** presentes em alguns AGNs (em particular os do tipo rádio-loud), os jatos são colimados por campos magnéticos e propagam-se a velocidades relativísticas. Eles são fontes importantes de emissão não térmica, como radiação síncrotron, visível em ondas de rádio e outros domínios espectrais.

Essa estrutura está ilustrada na Figura 1.2, a qual destaca como a geometria e a orientação influenciam diretamente a classificação observacional dos AGNs.

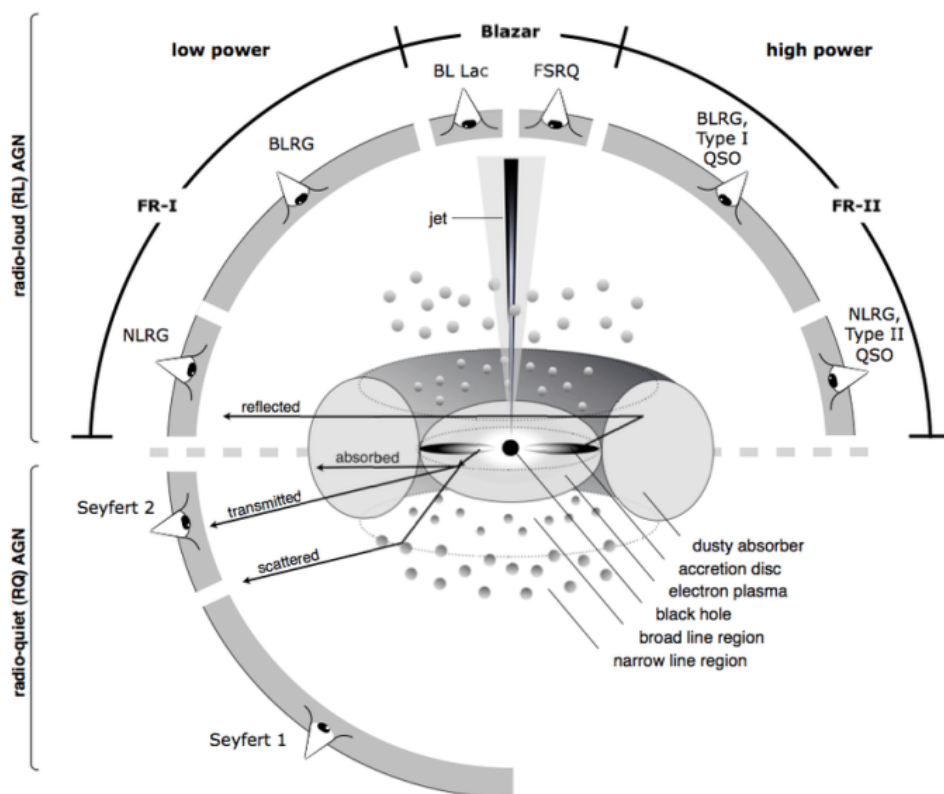


Figura 1.2: Esquema ilustrativo do modelo unificado dos AGNs. As diferentes aparências observacionais decorrem principalmente da orientação da linha de visada em relação ao torus. Imagem presente em Beckmann e Shrader (2012)

Com base nesse esquema unificado, diferentes classes de AGNs podem ser compreendidas como manifestações de uma mesma estrutura física observada sob diferentes ângulos

ou condições geométricas. A presença do toro de poeira e gás, a orientação da linha de visada com relação ao jato e ao disco de acreção, bem como a visibilidade (ou não) da BLR, definem as subclasses observadas.

Contudo, o modelo unificado tem passado por atualizações importantes à luz de observações recentes, especialmente com interferômetros no infravermelho, como o VLTI-MATISSE². Esses dados têm revelado que a poeira quente em AGNs não está confinada apenas a uma estrutura toroidal espessa no plano equatorial, como se assumia tradicionalmente, mas também aparece distribuída em direções polares – frequentemente formando cones ociosos alinhados com os eixos dos jatos relativísticos (Alexander *et al.*, 2025; Asmus, 2019; Asmus *et al.*, 2016). Esses resultados motivaram uma revisão conceitual do modelo unificado, que agora considera que o obscurecimento do núcleo pode ser causada tanto por um disco de poeira geometricamente fino (associado ao chamado *molecular torus*) quanto por estruturas do tipo *clumpy* (i.e., compostas por nuvens discretas) na base do cone polar.

Nesse novo cenário, a poeira polar seria sustentada por ventos impulsionados pela radiação do AGN, originados a partir do raio de sublimação da poeira e formando a borda de um cone ocioso visível por sua emissão em infravermelho (Alonso-Herrero *et al.*, 2021; Hönig, 2019). Embora esse modelo revisado ainda esteja em consolidação, ele tem o mérito de explicar diversas observações recentes e amplia nossa compreensão sobre a complexidade da região circumnuclear dos AGNs. A Figura 1.3 ilustra esse cenário moderno, onde estruturas polares, ventos moleculares e jatos relativísticos passam a desempenhar papel central na morfologia e na emissão nuclear observada em AGNs.

Essa versão revisada do modelo unificado não elimina a importância da orientação da linha de visada na determinação das propriedades observadas dos AGNs. Pelo contrário, ela amplia nossa compreensão ao mostrar que o obscurecimento do núcleo ativo pode ocorrer não apenas por um toro denso no plano equatorial, mas também por estruturas de poeira presentes nas regiões polares, moldadas por ventos do AGN. Assim, as diferenças observacionais — como a presença ou ausência de linhas largas ou a dominância do núcleo no espectro — ainda podem ser explicadas por efeitos de geometria e orientação, mas agora levando em conta uma estrutura mais dinâmica e complexa do meio circumnuclear (Alexander *et al.*, 2025).

O modelo unificado (Figura 1.2) prevê essencialmente três ramos principais, associados a diferentes regimes de luminosidade e propriedades de jato: galáxias Seyfert, rádio-galáxias Fanaroff-Riley (FR) e blazares:

Galáxias Seyfert: predominam em redshifts baixos (o que é, em parte, um efeito de seleção observacional, dado que AGNs de baixa luminosidade são difíceis de detectar em

²Mais informações em <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/matisse.html>

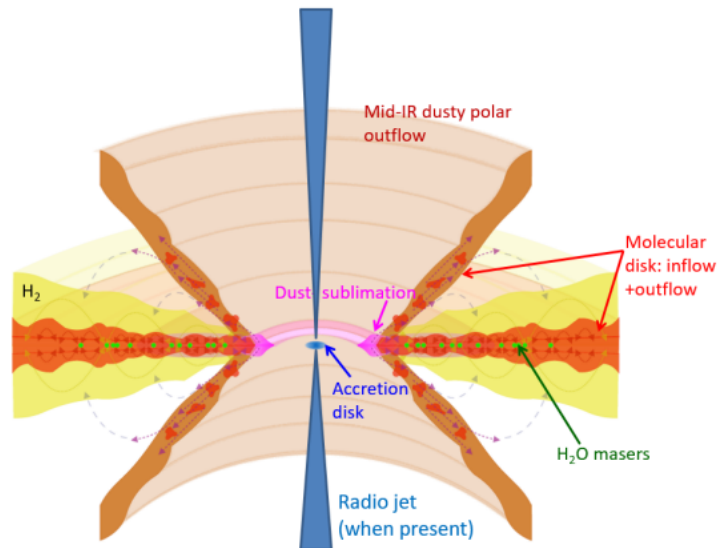


Figura 1.3: Esquema ilustrativo do ambiente circumnuclear de AGNs no modelo revisado. O disco molecular (ou *torus* fino) coexiste com um cone de poeira polar moldado por ventos do AGN. Jatos relativísticos e outflows moleculares seguem a direção polar. Adaptado de [Alexander et al. \(2025\)](#), baseado em [Hönig \(2019\)](#).

grandes distâncias com a tecnologia atual, embora telescópios como o JWST estejam mudando essa perspectiva) e formam uma das classes mais estudadas de AGNs. A primeira divisão em duas classes foi proposta por [Khachikian e Weedman \(1971\)](#), com base na largura das linhas de emissão observadas nos espectros ópticos.

- (i) **Seyfert tipo 1:** apresentam simultaneamente linhas de emissão largas (com FWHM³ típicos entre $\sim 1.000 - 10.000$ km/s) e estreitas (FWHM ~ 500 km/s), associadas, respectivamente, à região de linhas largas e à região de linhas estreitas ([Netzer, 2013](#); [Osterbrock e Ferland, 2006b](#)). A presença de linhas largas, como $H\alpha$ e $H\beta$, indica uma visada direta à BLR, localizada a escalas sub-parsec — tipicamente entre $\sim 0,01$ e 1 parsec do buraco negro supermassivo, dependendo da luminosidade do AGN. Essas galáxias também podem apresentar variabilidade no contínuo e nas próprias linhas largas, reflexo das mudanças na emissão proveniente da BLR.
- (ii) **Seyfert tipo 2:** exibem apenas linhas de emissão estreitas. A ausência de componentes largas é interpretada, no modelo unificado, como resultado da obstrução da BLR por um toro de poeira orientado de forma que bloqueia a visão direta dessa região. No entanto, observações em espectros polarizados (por exemplo, [Antonucci 1993](#)) revelaram componentes largas refletidas, confirmando a presença oculta da BLR em muitos desses objetos.

³O parâmetro FWHM (do inglês, *Full Width at Half Maximum*) representa a largura da linha de emissão medida à metade de sua intensidade máxima e é frequentemente utilizado como uma estimativa da velocidade de dispersão do gás emissor. Linhas mais largas indicam movimentos mais rápidos, típicos de regiões mais próximas ao buraco negro central.

(iii) **Seyfert tipo 1.5 a 1.9:** classes intermediárias definidas com base na fraqueza progressiva das componentes largas das linhas de Balmer. Em Seyferts 1.5, tanto $H\alpha$ quanto $H\beta$ mostram componentes largas, embora mais fracas que em Seyfert 1; em Seyfert 1.8, apenas uma fraca linha larga de $H\beta$ é visível; e em Seyfert 1.9, a linha larga aparece apenas em $H\alpha$, sendo ausente ou muito fraca nas outras. Em muitos casos, linhas largas podem ser reveladas apenas em observações no infravermelho ou por espectroscopia polarizada (Goodrich, 1995; Osterbrock, 1981).

Essas diferenças são interpretadas não como variações fundamentais na natureza dos AGNs, mas como efeitos de orientação e obstrução (conforme o *modelo unificado*), embora fatores como a taxa de acreção e a quantidade de poeira também possam desempenhar papel relevante.

Fanaroff-Riley (FR): Esses AGNs possuem jatos relativísticos visíveis em rádio e são classificados com base na morfologia de sua emissão, conforme proposto por Fanaroff e Riley (1974):

- (i) **FR I:** jatos menos colimados, com brilho decrescente à medida que se afastam do núcleo (*edge-darkened*), geralmente associados a galáxias elípticas massivas, porém de baixa luminosidade de rádio. Estão frequentemente inseridos em ambientes mais densos, como aglomerados de galáxias, onde a interação com o meio pode contribuir para a dissipação dos jatos;
- (ii) **FR II:** jatos bem colimados que terminam em lóbulos brilhantes (*edge-brightened*), com *hotspots* nas extremidades, sendo mais comuns em AGNs de alta luminosidade. Têm maior capacidade de atravessar o meio intergaláctico, o que favorece a formação dos lóbulos simétricos.

A distinção entre FR I e FR II está correlacionada com a potência intrínseca do jato e o ambiente onde a galáxia está inserida (Ledlow e Owen, 1996). Além disso, no contexto dos modelos de unificação, quando esses objetos são observados com o eixo do jato próximo à linha de visada, o efeito Doppler relativístico torna o núcleo dominante e intensamente variável, levando à identificação do objeto como um blazar (Urry e Padovani, 1995). Além do mais, dependendo do ângulo de observação e do grau de obscurecimento nuclear, as galáxias de rádio — tanto FR I quanto FR II — podem apresentar diferentes aparências espectrais. Quando o núcleo ativo está obscurecido, observam-se predominantemente linhas estreitas no espectro óptico, caracterizando as chamadas *narrow-line radio galaxies* (NLRGs). Por outro lado, quando a linha de visada permite acesso parcial à região de linhas largas, surgem linhas de emissão largas no espectro, levando à classificação como *broad-line radio galaxies* (BLRGs). Essa diversidade é interpretada como consequência direta de orientação e estrutura do núcleo

ativo, reforçando os modelos de unificação para AGNs *radio-loud*.

Blazares: AGNs com jatos relativísticos orientados quase diretamente na direção do observador. A orientação favorece a amplificação relativística do brilho (efeito Doppler), tornando esses objetos extremamente brilhantes, variáveis e dominados por emissão não térmica (Giommi *et al.*, 2012; Urry e Padovani, 1995). Apresentam forte variabilidade em múltiplas escalas temporais (de minutos a anos), polarização significativa em rádio e óptico, e espectros caracterizados por duas componentes amplas no SED: uma associada à emissão síncrotron (do rádio ao ultravioleta/X) e outra, em altas energias (X/gama), atribuída à dispersão Compton (leptônica) ou processos hadrônicos. Blazares são subdivididos em duas classes principais:

- (i) **BL Lacertae objects (BL Lacs):** exibem espectros ópticos com poucas ou nenhuma linha de emissão, com emissão contínua dominada pelo jato. Estão geralmente associados a fontes de tipo Fanaroff-Riley I;
- (ii) **Quasares de espectro plano (FSRQs, do inglês *flat spectrum radio quasars*):** possuem linhas largas de emissão, com espectros mais parecidos aos de quasares tradicionais, e são geralmente associados a fontes FR II mais potentes.

No *modelo unificado* os blazares correspondem à visão ao longo da linha de visada dos jatos relativísticos de rádio-galáxias, sendo os análogos orientados de FR I (BL Lacs) e FR II (FSRQs). A variabilidade extrema e o brilho elevado tornam os blazares importantes sondas da física de jatos relativísticos, aceleração de partículas e produção de raios gama.

Adicionalmente, outras classes de AGNs, embora nem sempre encaixadas diretamente no modelo unificado padrão, são relevantes para a compreensão da diversidade dos núcleos ativos:

Quasares: AGNs extremamente luminosos e comuns em altos redshifts. Apresentam espectros dominados por linhas de emissão largas e intensa radiação contínua, sendo considerados versões de alta luminosidade das galáxias Seyfert (Schmidt, 1963; Vanden Berk *et al.*, 2001). Devido ao seu brilho excepcional, são detectáveis a grandes distâncias, funcionando como sondas fundamentais do Universo primordial, da evolução das galáxias e da história da reionização.

Historicamente, o termo *quasar* (de *quasi-stellar radio source*) referia-se apenas às fontes com emissão intensa em rádio — os chamados *radio-loud*. Posteriormente, identificaram-se objetos opticamente semelhantes, mas com emissão fraca ou ausente em rádio, denominados *quasi-stellar objects* (QSOs). Atualmente, é comum o uso do termo “quasar” para ambos os casos, distinguindo-os com base na emissão em rádio: *radio-loud*

e *radio-quiet*. A maioria dos quasares é *radio-quiet*, mas os *radio-loud* frequentemente exibem jatos relativísticos, podendo ser associados a fontes FR II ou a blazares, caso os jatos estejam orientados na direção do observador. Estudos sugerem que os quasares representam fases evolutivas intensas de acreção durante a formação e crescimento de buracos negros supermassivos nos centros galácticos. Seu feedback energético, por meio de ventos e radiação, pode desempenhar um papel crucial na regulação da formação estelar e no desenvolvimento de galáxias massivas (Di Matteo *et al.*, 2005; Hopkins *et al.*, 2006).

LINERs: apresentam espectros dominados por linhas de baixa ionização, podendo ser alimentados por mecanismos variados — desde núcleos ativos de baixa luminosidade até choques ou populações estelares velhas (Heckman, 1980; Ho, 2008). LINERs também podem ser classificados em diferentes tipos, conforme a detecção (ou não) de uma componente larga nas linhas de Balmer, especialmente na $H\alpha$, o que indica a presença de uma BLR:

- (i) **LINER tipo 1:** exibem uma fraca linha larga de $H\alpha$, mas não apresentam componentes largas em outras linhas de Balmer. A presença da BLR é incerta e muitas vezes controversa, dependendo da sensibilidade e resolução dos dados. Estudos como Cazzoli *et al.* (2018) mostraram que, mesmo para objetos classificados como tipo 1 a partir de espectros terrestres, apenas uma fração requer uma componente larga no ajuste. Entretanto, dados de alta resolução espacial do *Hubble Space Telescope* (HST) revelam componentes largas em $H\alpha$ em muitos desses casos.
- (ii) **LINER tipo 2:** não apresentam qualquer evidência observacional de BLR. A ausência de linhas largas torna sua natureza AGN controversa, já que mecanismos alternativos de ionização — como populações estelares evoluídas (estrelas pós-AGB) ou binárias de raios X de baixa massa — podem reproduzir características espectrais semelhantes (Ho *et al.*, 1997; McKernan *et al.*, 2010).

A classificação dos LINERs, portanto, depende fortemente da qualidade dos dados espectroscópicos e levanta questões fundamentais sobre os mecanismos físicos que dominam esses núcleos galácticos.

A compreensão dessas subclasses sob a ótica do modelo unificado fornece uma estrutura teórica robusta para interpretar os diversos fenômenos observados nos núcleos ativos. Dentre essas classes, os LINERs merecem atenção especial, especialmente no contexto de observações no infravermelho próximo, onde mecanismos alternativos de excitação de gás podem ser investigados com mais clareza.

- **Diferenças espectrais no NIR — um exemplo comparativo:**

Para ilustrar a diversidade espectral entre as subclasses de AGNs no NIR, apresentamos na Figura 1.4 os espectros de quatro galáxias da nossa amostra, representando diferentes classes e subclasses: duas Seyferts (tipo 1 e tipo 2) e dois LINERs (também ti-

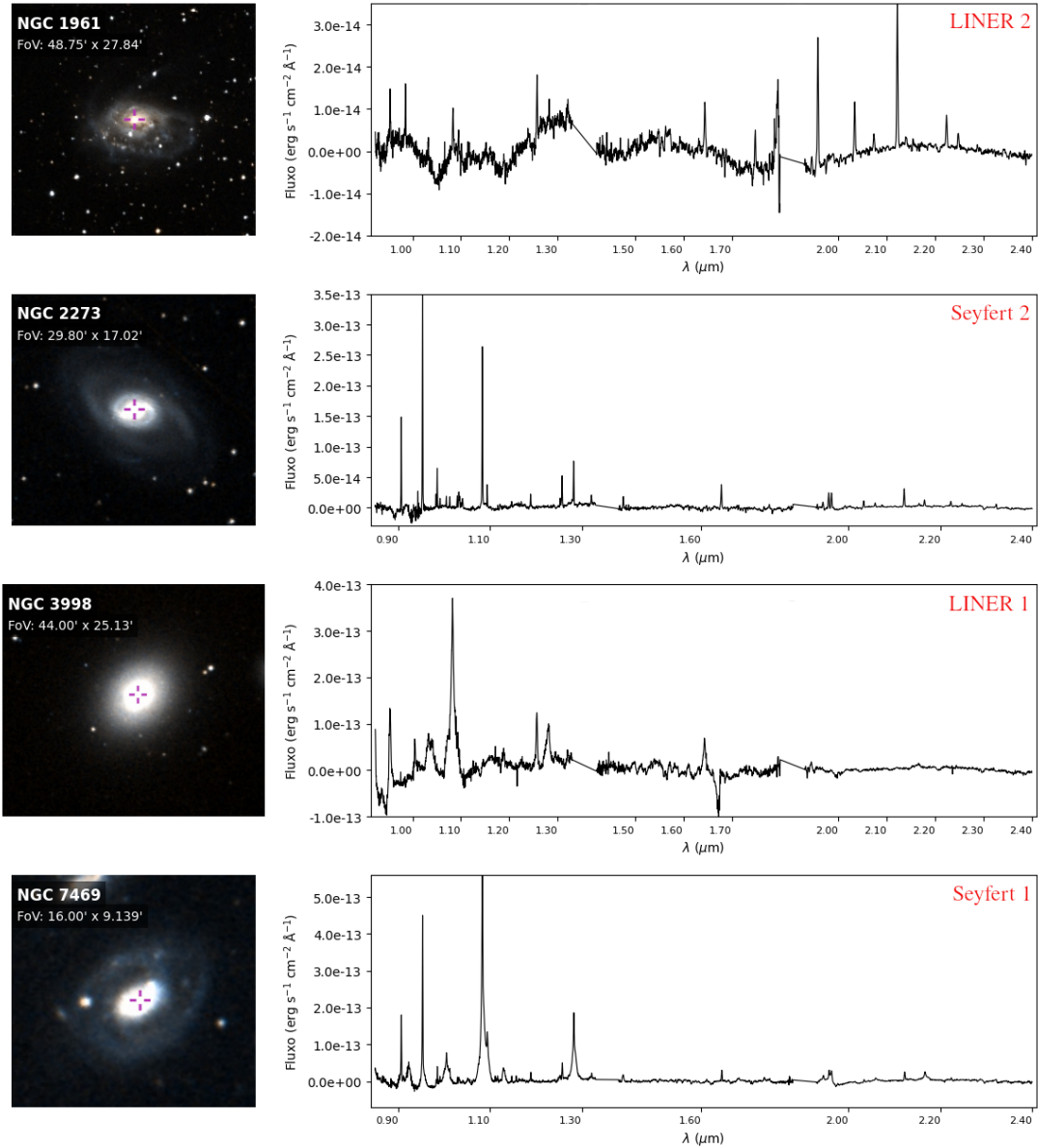


Figura 1.4: Imagens e espectros no infravermelho próximo para quatro galáxias da amostra, representando diferentes classificações de AGNs. Observam-se variações na distribuição e na intensidade das linhas de emissão, refletindo diferenças na natureza da fonte ionizante e na estrutura nuclear. Todos os espectros foram corrigidos pela velocidade sistêmica das respectivas galáxias. A extração dos espectros foi realizada com uma abertura padrão de 2'' centrada no núcleo. Fonte: Autora.

po 1 e 2). A comparação direta evidencia diferenças marcantes na intensidade e no perfil das linhas de emissão, refletindo as condições físicas distintas, como densidade, campo de radiação e geometria do núcleo ativo. Essa diversidade também demonstra a importância

de considerar o NIR como janela espectral complementar ao óptico, especialmente na identificação de regiões de emissão obscurecidas ou dominadas por mecanismos distintos de ionização.

A seguir, exploraremos com mais detalhe a natureza dos LINERs e os processos físicos responsáveis pela emissão de suas linhas espectrais no NIR, com ênfase especial nesse tipo de núcleo ativo por se tratar do foco principal deste trabalho.

1.2 LINERs e a Excitação do Gás no Infravermelho Próximo

1.2.1 Definição e características dos LINERs

Regiões de emissão nuclear de baixa ionização – conhecidas como LINERs – constituem uma das classes mais numerosas de núcleos ativos de baixa luminosidade no universo local (Heckman, 1980; Ho, 2008). Estima-se que cerca de um terço das galáxias próximas apresentem esse tipo de atividade nuclear, com essa fração aumentando para aproximadamente dois terços entre galáxias elípticas e lenticulares. Portanto, os LINERs constituem a classe mais comum de galáxias com núcleos ativos de baixa luminosidade (LLAGNs, do inglês *Low-luminosity active galactic nuclei*) no universo local.

A definição observacional clássica, baseada em espectros ópticos, foi proposta por Heckman (1980), segundo a qual um objeto é classificado como LINER quando apresenta as razões de linha $[\text{O II}]\lambda 3727/[\text{O III}]\lambda 5007 \gtrsim 1$ e $[\text{O I}]\lambda 6300/[\text{O III}]\lambda 5007 \gtrsim 1/3$. No entanto, esse critério sofre limitações, especialmente devido à grande separação em comprimento de onda entre as linhas envolvidas e à suscetibilidade da linha $[\text{O II}]\lambda 3727$ à extinção interestelar. Para contornar essas dificuldades, critérios alternativos foram sugeridos por Osterbrock (1989), baseando-se em razões de linhas que por estarem muito próximas em comprimento de onda, o valor da razão não é afetado por extinção: $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta < 3$, $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha > 0.05$, $([\text{S II}]\lambda 6716 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha > 0.4$ e $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha > 0.5$.

A semelhança entre LINERs e Seyferts do tipo 2 no espectro óptico levou à adoção de diagramas de diagnóstico, como os propostos por Baldwin *et al.* (1981) – os chamados diagramas BPT⁴ – que comparam pares de razões de linhas cujos valores são sensíveis ao tipo de espectro ionizante, como $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$, permitindo distinguir entre regiões H II, Seyferts e LINERs. LINERs ocupam uma região distinta nesses diagramas, caracterizadas por altos valores de $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, mas relativamente baixos valores de $[\text{O III}]/\text{H}\beta$, em contraste com Seyferts que apresentam ambas as razões elevadas. A Figura 1.5 ilustra um exemplo aplicado a uma subamostra de galáxias do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS)⁵, conforme apresentado por Bamford *et al.* (2008), utilizando critérios

⁴Devido aos autores Baldwin, Phillips e Terlevich (Baldwin *et al.*, 1981).

⁵<https://www.sdss.org/>

de classificação baseados nas curvas de [Kewley et al. \(2001\)](#), [Kauffmann et al. \(2003\)](#) e [Stasińska et al. \(2006\)](#) para separar regiões dominadas por formação estelar (SF, do inglês *star formation*), uma combinação de SF e AGN (SF+AGN ou AGN+SF) e regiões dominadas por AGNs (LINERs ou Seyferts).

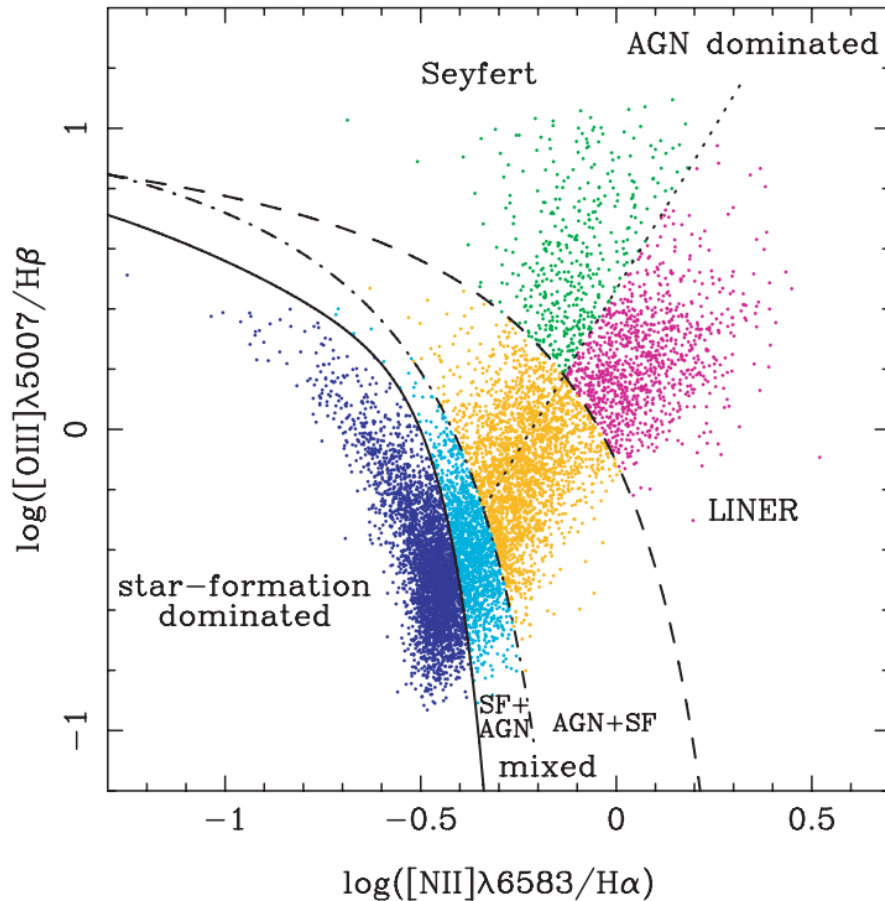


Figura 1.5: Diagrama de diagnóstico BPT aplicado a uma amostra do SDSS, comparando as razões de linhas $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ e $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$. As classificações seguem os critérios empíricos propostos por [Stasińska et al. \(2006\)](#), [Kauffmann et al. \(2003\)](#) e [Kewley et al. \(2001\)](#), que separam galáxias dominadas por formação estelar (azul), regiões de transição (em ciano e amarelo) e galáxias dominadas por AGNs, subdivididas em Seyferts (verde) e LINERs (rosa). Adaptado de [Bamford et al. \(2008\)](#).

Observações em diferentes faixas espectrais revelaram uma grande diversidade dentro dessa classe. Enquanto alguns objetos exibem linhas de emissão largas (especialmente $\text{H}\alpha$), outras fontes apresentam espectros dominados por emissão estreita e fraca, sugerindo diferentes origens físicas e distintos graus de atividade nuclear ([Barth et al., 1999](#); [Ho et al., 1997](#)). Para casos de alta extinção, nos quais as linhas ópticas são de difícil detecção, foi proposta uma extensão dos critérios de classificação para o NIR. Trabalhos como os de [Larkin et al. 1998a](#), [Rodríguez-Ardila et al. 2004](#), [Rodríguez-Ardila et al. 2005](#), [Riffel et al. 2013b](#), [Colina et al. 2015b](#) sugerem o uso de diagramas de diagnósticos no NIR, como as razões $[\text{Fe II}]\lambda 1.257\mu\text{m}/\text{Pa}\beta$ e $\text{H}_2\lambda 2.121\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$, permitindo a separação entre

LINERs, Seyferts e regiões H II mesmo em ambientes obscurecidos.

Modelos teóricos sugerem que os espectros de emissão de LINERs são consistentes com fotoionização por um contínuo com forma espectral semelhante ao de um Seyfert, porém com uma intensidade (ou taxa de fótons ionizantes) significativamente menor (Ferland e Netzer, 1983). A presença de linhas como [O I] λ 6300, cuja excitação requer uma zona parcialmente ionizada com densidade e temperatura elevadas, é indicativa de um espectro ionizante com forma de lei de potência. Isso se deve ao fato de que essas condições dificilmente são alcançadas com espectros estelares térmicos, que ionizam completamente o hidrogênio antes de criar uma zona propícia à emissão de [O I].

Apesar disso, a natureza física dos LINERs permanece fortemente debatida. A proposta inicial de Heckman (1980) sugeria que os espectros eram gerados por choques no gás nuclear, hipótese posteriormente sustentada por modelos como os de Dopita e Sutherland (1995), que mostram que gás aquecido por choques reproduzem bem os espectros observados. Por outro lado, modelos de fotoionização por uma fonte não térmica, como um AGN de baixa luminosidade, também explicam a emissão observada, sendo essa hipótese apoiada por detecções de linhas largas (Bower *et al.*, 1996; Ho *et al.*, 1997; Storchi-Bergmann *et al.*, 1993) e indícios de discos de acreção ao redor de buracos negros supermassivos (Barth *et al.*, 2001). Alternativamente, alguns autores propõem que a fonte ionizante pode ser um aglomerado compacto de estrelas jovens e massivas, como estrelas Wolf-Rayet ou do tipo OB (Barth e Shields, 2000; Filippenko e Terlevich, 1992; Terlevich e Melnick, 1985). Além do mais, Flohic *et al.* (2006) propuseram que a emissão nas LINERs pode ser alimentada pela interação mecânica entre jatos ou ventos de AGNs e o meio interestelar.

Um mecanismo adicional, hoje bastante discutido, envolve as estrelas evoluídas quentes de baixa massa (HOLMES, do inglês *Hot Low-Mass Evolved Stars*). Esses objetos – como estrelas pós-AGB e centrais de nebulosas planetárias – emitem radiação ultravioleta dura capaz de sustentar linhas de baixa ionização. Stasińska (2011) mostraram que populações estelares antigas dominam as galáxias LINER-*like* (“do tipo” LINER) e que os fótons do contínuo de Lyman produzidos pelas HOLMES são suficientes para explicar suas posições no diagrama BPT. Em cerca de um terço das galáxias LINER-*like* do SDSS, a emissão de H α pode ser atribuída quase integralmente às HOLMES, sem a necessidade de invocar um AGN (Cid Fernandes *et al.*, 2011), levando ao conceito de galáxias aposentadas (para mais detalhes, ver Stasińska *et al.* 2008).

Essa multiplicidade de cenários possíveis faz dos LINERs um laboratório astrofísico ideal para o estudo da transição entre ionização estelar e atividade nuclear galáctica. A crescente quantidade de observações em diferentes faixas espectrais — do rádio ao ultravioleta e raios X — revela que os LINERs formam uma classe notavelmente diversa e heterogênea. Enquanto alguns objetos exibem características compatíveis com atividade nuclear, como a presença de linhas largas, fontes compactas de rádio e emissão em raios X

duros, outros apresentam espectros dominados por populações estelares evoluídas, sem sinais claros de acreção ativa. Essa diversidade levou ao desenvolvimento de múltiplos cenários teóricos para explicar a origem das linhas de emissão observadas, variando desde modelos de fotoionização por AGNs fracos até choques e fontes estelares quentes. Nesse contexto, compreender os principais mecanismos de excitação que atuam nos LINERs torna-se essencial para elucidar a verdadeira natureza dessas galáxias e seu papel na transição entre processos ionizantes estelares e nucleares.

1.2.2 Principais mecanismos de excitação

A natureza dos mecanismos que excitam o gás nos LINERs é uma questão ainda em aberto e objeto de intenso debate. Diversos mecanismos têm sido propostos para explicar as linhas observadas, e há evidências de que diferentes fontes podem coexistir em uma mesma galáxia:

- **Fotoionização por AGNs fracos:** A presença de um buraco negro supermassivo com baixa taxa de acreção pode gerar radiação suficiente para ionizar o gás, mesmo em níveis modestos, produzindo espectros típicos de LINERs (Ferland e Netzer, 1983; Halpern e Steiner, 1983). Observações em raios X e rádio sustentam essa hipótese para muitos objetos (Ho, 2008).
- **Choques:** A ionização pode ser induzida por frentes de choque de alta velocidade, associadas a fluxos não rotacionais ou turbulência no meio interestelar. Esse cenário é consistente com as larguras de linha observadas, que frequentemente alcançam centenas de km/s (Dopita e Sutherland, 1995; Harms *et al.*, 1994).
- **Estrelas pós-AGB:** Em galáxias elípticas e lenticulares, populações de estrelas em estágio pós-AGB podem fornecer fótons ionizantes suficientes para gerar emissões características de LINERs, especialmente em regiões estendidas (Binette *et al.*, 1994; Singh *et al.*, 2013; Stasińska *et al.*, 2008).
- **Formação estelar recente:** Em alguns casos, o contínuo UV pode ser dominado por estrelas jovens massivas, como as do tipo Wolf-Rayet, cujos ventos estelares contribuem para a ionização do gás (Barth e Shields, 2000).

É importante ressaltar que muitos LINERs parecem ser energizados por uma combinação desses mecanismos. Estudos utilizando espectroscopia de campo integral (do inglês *Integral Field Unit*, IFU) — técnica que permite obter espectros em cada ponto de uma região espacial da galáxia — revelam que tanto fontes compactas quanto componentes estendidos contribuem para a emissão observada. Isso implica em uma complexa interação entre processos internos e externos às galáxias hospedeiras (Loubser e Soechting, 2013; Ricci *et al.*, 2015).

1.2.3 Importância do estudo no infravermelho próximo

A faixa do infravermelho próximo oferece uma janela privilegiada para investigar os mecanismos de excitação nos LINERs, especialmente em ambientes obscurecidos por poeira. As linhas de emissão observadas nessa faixa, como [Fe II] $\lambda 12570$ Å, [S III] $\lambda 9530$ Å e as transições de recombinação do hidrogênio ($\text{Pa}\beta$, $\text{Pa}\gamma$), são menos afetadas pela extinção interestelar em comparação com as linhas ópticas, permitindo a sondagem de regiões internas das galáxias que seriam inacessíveis no visível. A curva de extinção apresentada na Figura 1.6 mostra que a absorção interestelar é muito mais severa em comprimentos de onda menores, como no ultravioleta e no óptico, enquanto diminui consideravelmente no infravermelho. Isso reforça a vantagem do NIR para o estudo de regiões internas das galáxias, onde a poeira dificulta ou impossibilita observações em faixas mais energéticas.

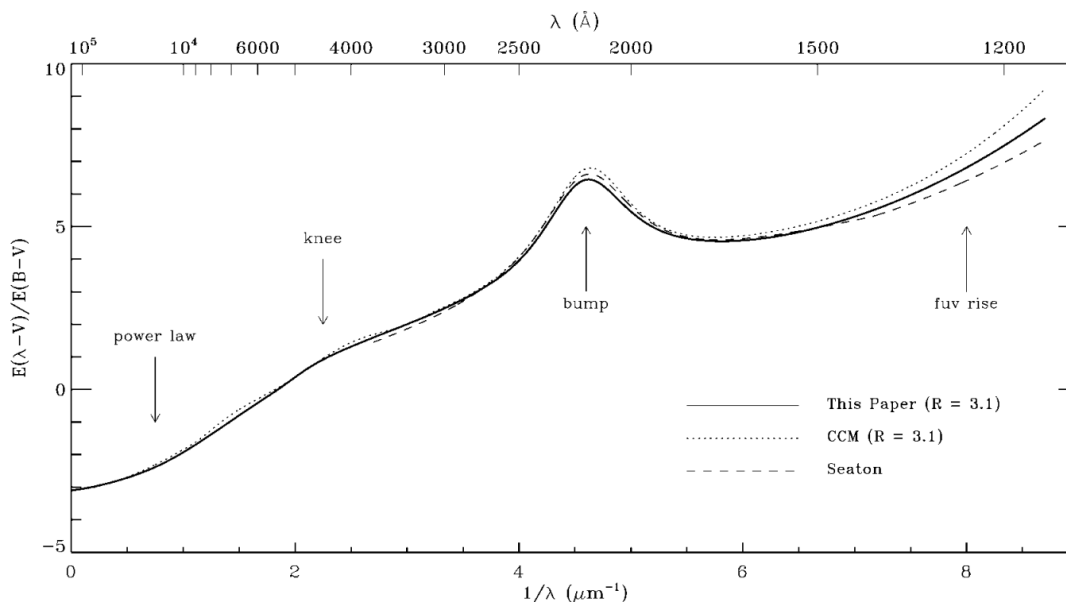


Figura 1.6: Curvas de extinção interestelar normalizadas, desde o infravermelho distante até o ultravioleta, plotadas em função do inverso do comprimento de onda. As curvas representam diferentes estimativas para a extinção média na Galáxia com $R_V = 3,1$: a curva sólida é a obtida por Fitzpatrick (1999), a pontilhada segue Cardelli *et al.* (1989a), e a tracejada corresponde à média observada no UV por Seaton (1979). Algumas feições características são destacadas: a subida suave no infravermelho (*power law*), uma inflexão na região óptica (*knee*), um proeminente ressalto em 2175 Å (*bump*), e o crescimento acentuado no UV extremo (*fuv rise*). Adaptado de Fitzpatrick (1999)

Além disso, o NIR é particularmente sensível a processos de excitação por choques. A linha de [Fe II], por exemplo, é um traçador robusto de regiões onde há destruição de grãos e ionização, frequentemente associadas a frentes de choque (Mouri *et al.*, 2000). Dessa forma, a análise das razões entre essas linhas constitui um diagnóstico eficaz para distinguir entre excitação térmica — como aquela produzida por AGNs fracos — e processos não térmicos, como choques ou formação estelar recente.

O uso do NIR também permite estudar LINERs em diferentes contextos evolutivos e morfológicos, incluindo sistemas em que coexistem populações estelares jovens e evoluídas, além de componentes ionizantes compactos e estendidos. Estudos têm mostrado que a emissão de [Fe II] no NIR pode estar associada tanto à ação de jatos e ventos galácticos quanto à fotoionização por AGNs de baixa luminosidade (Riffel *et al.*, 2006b; Rodríguez-Ardila *et al.*, 2004). As razões entre as intensidades de [Fe II] e das linhas de recombinação do hidrogênio funcionam como diagnósticos para diferenciar a contribuição de choques e de campos de radiação ionizante.

Neste trabalho, aproveitamos o potencial do NIR para investigar a natureza da ionização em uma amostra de LINERs, com base na análise de razões de linhas obtidas por espectroscopia de média resolução ($R \sim 1800$). Empregamos diagramas de diagnóstico específicos (detalhados na subseção abaixo) para essa faixa espectral como ferramenta auxiliar na reclassificação das fontes, com o objetivo de distinguir entre ionização por AGNs, choques e regiões de formação estelar de forma mais precisa e menos dependente da extinção.

1.2.4 Diagramas de diagnóstico no infravermelho próximo

Diagramas de diagnóstico baseados em razões de linhas de emissão são ferramentas fundamentais para investigar os mecanismos de excitação do gás em galáxias. Embora tradicionalmente aplicados no regime óptico — como no clássico diagrama BPT (Baldwin *et al.*, 1981), versões adaptadas para o infravermelho próximo têm ganhado destaque por sua capacidade de contornar os efeitos da extinção por poeira, especialmente em regiões fortemente obscurecidas.

Entre as primeiras propostas de diagramas de diagnósticos no NIR, Rodríguez-Ardila *et al.* (2004) introduziram um conjunto de relações envolvendo [Fe II] $1.257\mu\text{m}/\text{Pa}\beta$ e H_2 $2.121\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$, capazes de distinguir entre processos de fotoionização (como em regiões H II e AGNs) e excitação por choques. A principal vantagem dessa combinação é incluir a emissão de H_2 , que pode ser excitada tanto por radiação fluorescente quanto por choques, enquanto a linha de [Fe II] está associada a regiões parcialmente ionizadas e destruição de grãos.

Mais recentemente, Calabrò *et al.* (2023) propuseram uma nova geração de diagramas de diagnóstico no NIR, explorando combinações complementares de linhas que traçam diferentes fases do gás interestelar. Esses diagramas buscam fornecer uma separação mais clara entre excitação por formação estelar, núcleos ativos e choques, e incluem três grupos principais, cada um sensível a diferentes processos físicos:

- **Fe2S3- β** : diagramas que combinam [Fe II] $1.257\mu\text{m}/\text{Pa}\beta$ com [S III] $0.953\mu\text{m}/\text{Pa}\gamma$ ou $\text{Pa}\beta$. A linha de [Fe II] é sensível à presença de choques e regiões parcialmente

ionizadas, e sua comparação com [S III] permite distinguir entre diferentes fontes de excitação, como formação estelar, AGNs e choques.

- **CIS3:** diagramas que relacionam as razões [S III] $0.953 \mu\text{m}/\text{Pa}\gamma$ ou [S III] $0.953 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$ com [C I] $0.985 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$. A linha de [C I] é um traçador eficiente de regiões neutras ou parcialmente ionizadas, enquanto [S III] está associada a regiões altamente ionizadas, permitindo investigar a coexistência de diferentes fases do gás.
- **P2S3:** diagramas que envolvem [P II] $1.188 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$ versus [S III] $0.953 \mu\text{m}/\text{Pa}\gamma$ ou $\text{Pa}\beta$. A linha de [P II] também traça gás parcialmente ionizado, sendo útil em casos onde [Fe II] está ausente ou fraca. Esses diagramas fornecem uma alternativa importante para o diagnóstico da excitação em ambientes de baixa ionização.

Esses diagramas foram desenvolvidos para abranger uma ampla gama de condições físicas e são particularmente valiosos para estudar populações galácticas em diferentes estágios evolutivos e faixas de redshift. A escolha entre eles depende da disponibilidade e intensidade das linhas observadas, bem como do regime de extinção ao qual a fonte está sujeita. Dessa forma, os diagramas de [Rodríguez-Ardila et al. \(2004\)](#) nos permitem selecionar objetos com perfis característicos de LINERs, enquanto os diagramas de [Calabrò et al. \(2023\)](#) aprofundam a análise sobre os mecanismos de excitação presentes em cada fonte. A aplicação combinada dessas abordagens oferece uma ferramenta poderosa para a reclassificação precisa de galáxias e para o entendimento das condições físicas que regem seus núcleos.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é investigar os mecanismos físicos responsáveis pela excitação do gás ionizado em núcleos galácticos classificados como LINERs, por meio da análise espectral no infravermelho próximo. Para isso, utilizamos uma amostra de objetos extraída de [Mason et al. \(2015\)](#), composta por espectros de média resolução no NIR, que permitem a medição precisa de linhas de emissão sensíveis a diferentes mecanismos de excitação. A partir dessas observações, buscamos reavaliar a natureza da ionização nessas regiões, empregando diagramas de diagnóstico adaptados ao infravermelho próximo como ferramentas para distinguir entre excitação por AGNs fracos, choques e formação estelar recente. Este enfoque é particularmente relevante para LINERs, cuja classificação óptica pode ser fortemente impactada pela extinção por poeira, dificultando a identificação do mecanismo dominante de excitação.

Este estudo busca responder às seguintes perguntas centrais:

1. Quais são os mecanismos dominantes de excitação do gás em LINERs observados no infravermelho próximo?
2. Em que medida a espectroscopia NIR pode fornecer reclassificações mais robustas e menos afetadas por extinção em relação às classificações baseadas em espectros ópticos?
3. É possível identificar evidências claras de contribuição simultânea de múltiplos processos (fotoionização, choques, formação estelar) em uma mesma fonte?
4. Os diagramas de diagnóstico no NIR apresentam consistência com os modelos teóricos propostos para diferentes fontes de excitação?

A aplicação sistemática de diagramas de diagnóstico no infravermelho próximo pode oferecer uma via alternativa e complementar para a classificação espectral de galáxias, além de possibilitar a detecção de múltiplas componentes excitadoras coexistentes. Com o advento de observações no NIR de alta sensibilidade proporcionadas pelo JWST, torna-se ainda mais relevante explorar o maior número possível de linhas de emissão, a fim de investigar os mecanismos de excitação do gás também em galáxias de alto redshift. Os resultados obtidos podem, assim, fornecer subsídios observacionais importantes tanto para modelos de evolução galáctica quanto para o mapeamento das diferentes fases de atividade nuclear no universo local e distante.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No Capítulo 2, apresentamos os dados, os procedimentos de processamento e as ferramentas utilizadas neste trabalho. O Capítulo 3 apresenta os resultados obtidos, nos quais descrevemos os espectros NIR e exploramos os diagramas de diagnóstico aplicados para investigar os mecanismos de excitação do gás. No Capítulo 4, discutimos os objetos classificados como LINERs Tipo 1 presentes na amostra, com o objetivo de compreendê-los de forma mais aprofundada. Finalmente, no Capítulo 5, destacamos as principais conclusões deste estudo.

Capítulo 2

Obtenção e Processamento dos Dados

Este capítulo detalha a amostra de galáxias investigada e os procedimentos de processamento de dados empregados neste trabalho. A Seção 2.1 aborda a definição da amostra, a instrumentação utilizada nas observações e as etapas de redução dos dados. A Seção 2.2 explora as particularidades das observações no infravermelho próximo, incluindo o impacto das regiões telúricas e das absorções moleculares. Por fim, as Seções 2.3 e 2.4 descrevem, respectivamente, a metodologia para a síntese espectral e o ajuste das linhas de emissão.

2.1 Amostra, Aquisição de Dados e Redução

2.1.1 Definição da amostra

A amostra analisada neste trabalho corresponde a uma subamostra do estudo realizado por [Mason *et al.* \(2015\)](#), que utilizou espectros no infravermelho próximo para investigar AGNs próximos. A amostra completa é composta por 50 galáxias, com distâncias variando entre 1 e 92 Mpc, e abrange uma ampla gama de morfologias, desde elípticas (E) até espirais irregulares tardias (Sm). Todos os objetos pertencem ao levantamento de galáxias do Palomar ([Ho *et al.*, 1995, 1997](#)), no qual foram originalmente classificados como Seyferts, LINERs ou objetos de transição. Adicionalmente, uma galáxia (NGC 7469) foi incluída na amostra, embora não faça parte do levantamento Palomar, sendo incorporada com o objetivo de servir como referência comparativa devido à sua natureza bem estabelecida como Seyfert 1. Destas 50 galáxias, 47 foram utilizadas nesta tese.

A seleção priorizou galáxias com núcleos de baixa luminosidade em raios X ($\log L_{2-10\text{keV}} \approx 37-43.2$), o que permite que o contínuo não térmico do AGN não obscureça as assinaturas espectrais das populações estelares da galáxia hospedeira. Muitas apresentam morfologia semelhante à da Via Láctea — como a NGC 4548, do tipo SB(rs)b — o que favorece análises em um contexto evolutivo mais próximo ao da nossa própria Galáxia. A Tabela 2.1 apresenta as principais propriedades físicas e morfológicas dos

Tabela 2.1: Amostra de galáxias analisadas e suas propriedades.

ID (I)	Galáxia (II)	Distância (Mpc) (III)	Morfologia (IV)	Atividade (V)	Redshift (z) (VI)
1	NGC 4235	35.1	SA(s)a	Sy1.2	0.00755
2	NGC 3031	3.7	SA(s)ab	Sy1.5	-0.00013
3	NGC 5033	18.7	SA(s)c	Sy1.9	0.00291
4	NGC 4395	4.1	SA(s)m?	Sy1.8	0.00106
5	NGC 2639	42.6	(R)SA(r)a?	Sy1.9	0.01113
6	NGC 4258	7.2	SAB(s)bc	Sy1.9	0.00154
7	NGC 4388	18.8	SA(s)b?	Sy1.9	0.00842
8	NGC 4565	9.7	SA(s)b?	Sy1.9	0.00428
9	NGC 4579	16.8	SAB(rs)b	Sy1.9/L1.9	0.00506
10	NGC 1167	65.3	SA0-	Sy2/L2	0.01653
11	NGC 1358	57.2	SAB0/a(r)	Sy2	0.01344
12	NGC 2273	28.4	SB(r)a?	Sy2	0.00614
13	NGC 2655	24.4	SAB0/a(s)	L2/Sy2	0.00467
14	NGC 3079	16.7	SB(s)c	Sy2	0.00369
15	NGC 3147	40.9	SA(rs)bc	Sy2	0.00935
16	NGC 4725	13.1	SAB(r)ab pec	Sy2:	0.00403
17	NGC 5194	7.7	SA(s)bc pec	Sy2	0.00174
18	NGC 7743	21.1	(R)SB0 ⁺ (s)	Sy2	0.00566
19	NGC 266	63.8	SB(rs)ab	L1.9	0.01547
20	NGC 315	65.8	E+	L1.9/Sy1	0.01648
21	NGC 1052	20.8	E4	L1.9/Sy2	0.00520
22	NGC 3718	17.3	SA(s)a pec	L1.9	0.00331
23	NGC 3998	21.6	SA0 ⁰ (r)?	L1.9/Sy1.9	0.00340
24	NGC 4203	18.8	SAB0 ⁻ ?	L1.9	0.00362
25	NGC 4450	16.8	SA(s)ab	L1.9	0.00652
26	NGC 4750	26.1	(R)SA(r)ab	L1.9	0.00540
27	NGC 5005	20.1	SAB(rs)bc	L1.9	0.00316
28	NGC 404	3.8	SA0 ⁻ (s)?	L2	-0.00016
29	NGC 474	28.0	(R')SA(s) ⁰	L2	0.00772
30	NGC 1961	53.1	SAB(rs)C	L2	0.01312
31	NGC 2768	20.5	E6?	L2/Sy1.2	0.00451
32	NGC 2832	91.6	cD2?/E+2?	L2?	0.02301
33	NGC 3169	19.7	SA(s)a pec	L2?/Sy2	0.00411
34	NGC 3190	22.4	SA(s)a pec	L2?	0.00437
35	NGC 3607	18.8	SA0 ⁰ (s)?	Sy2	0.00310
36	NGC 4346	17.0	S0	L2?	0.00277
37	NGC 4548	15.8	SB(rs)b	L2	0.00162
38	NGC 4594	20.0	SA(s)a	L2/Sy1.9	0.00364
39	NGC 5273	16.7	SA0 ⁰ (s)	Sy1.9	0.00361
40	NGC 5371	37.8	SAB(rs)bc	Sy?/L2	0.00853
41	NGC 6500	39.6	SAab?	L2	0.01002
42	NGC 5850	28.5	SB(r)b	L2	0.00849
43	NGC 7217	18.4	(R)SA(r)ab	L2	0.00315
44	NGC 410	16.0	E+?/cD?	T2?	0.01736
45	NGC 7331	14.3	SA(s)b	T2	0.00272
46	NGC 205	0.8	E5 pec	-	-0.00080
Galáxias não-Palomar					
47	NGC 7469	57.0	(R')SAB(rs)a	Sy1	0.01626(7)

Notas: (I) Identificação da galáxia; (II) Nome comum; (III) Distâncias em Mpc obtidas do NED e do catálogo HyperLeda; (IV) Morfologias extraídas do NED e do HyperLeda; (V) Tipo de atividade nuclear — Sy = Seyfert, L = LINER, T = objeto de transição. As interrogações “?” indicam classificação incerta; (VI) Redshift (z) obtido do NED.

objetos analisados, incluindo a distância (em Mpc), o tipo morfológico, a classificação da atividade nuclear e o redshift (z). As informações apresentadas foram obtidas a partir de bases de dados consolidadas na literatura, como o *NASA/IPAC Extragalactic Database* (NED) e o catálogo HyperLeda (Paturel *et al.*, 2003).¹

Predominam na seleção galáxias do tipo Seyfert (tipos 1 e 2) e LINERs, além de

¹NED: <https://ned.ipac.caltech.edu>
HyperLeda: <http://atlas.obs-hp.fr/hyperleda/>

alguns objetos de transição e fontes não pertencentes ao levantamento Palomar. Essa variedade de formas estruturais e de tipos de atividade nuclear é fundamental para a análise comparativa dos mecanismos de excitação do gás ionizado, permitindo investigar como diferentes processos físicos atuam em ambientes com distintos níveis de atividade central.

2.1.2 Observações e instrumentação

As observações espectrais foram realizadas com o espectrógrafo GNIRS (Gemini Near-Infrared Spectrograph), acoplado ao telescópio Gemini North (8,1 m), utilizando o modo cross-dispersed (XD), apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2. Esse modo proporciona cobertura espectral contínua entre 0.85 e 2.5 μm (8500 – 25,000 \AA), permitindo a observação simultânea das bandas z , J , H e K . A configuração utilizada incluía a câmera “short blue”, rede de 32 linhas/mm e fenda de 0.8”, resultando em resoluções espectrais entre $R \approx 1300$ e 1800, com escala de 0.15”/pixel. A orientação da fenda foi, em geral, alinhada com o ângulo paralático médio, a fim de minimizar os efeitos da refração atmosférica diferencial ao longo do amplo intervalo espectral coberto. Detalhes específicos sobre os parâmetros observacionais — como tempo de exposição, datas de aquisição e ângulos de posicionamento da fenda — podem ser consultados na Tabela 2 de [Mason et al. \(2015\)](#).

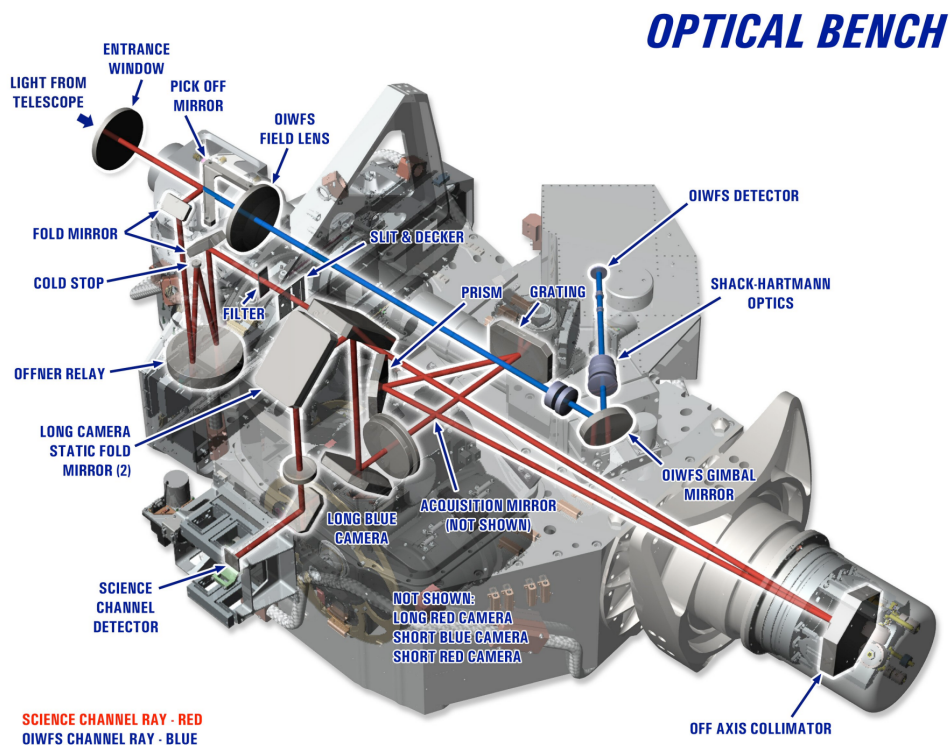


Figura 2.1: Ópticas e mecanismos do GNIRS dentro da estrutura do instrumento. O trajeto azul indica o sensor de frente de onda (*On-Instrument Wave-Front Sensor*, OIWFS); o trajeto vermelho mostra o feixe científico utilizado no espectrógrafo. Disponível em <https://www.gemini.edu/instrumentation/gnirs>

As observações foram realizadas em modo fila entre maio de 2011 e agosto de 2013, com dados provenientes tanto de programas padrão quanto de programas destinados a condições adversas (*poor weather programs*). Consequentemente, a qualidade dos espectros resultantes é variada. Alguns conjuntos de dados com baixa razão sinal-ruído (S/N), afetados por más condições de observação ou por falhas na subtração das linhas de emissão do céu (notadamente na banda H), foram excluídos da amostra final, segundo os critérios adotados pelos autores.

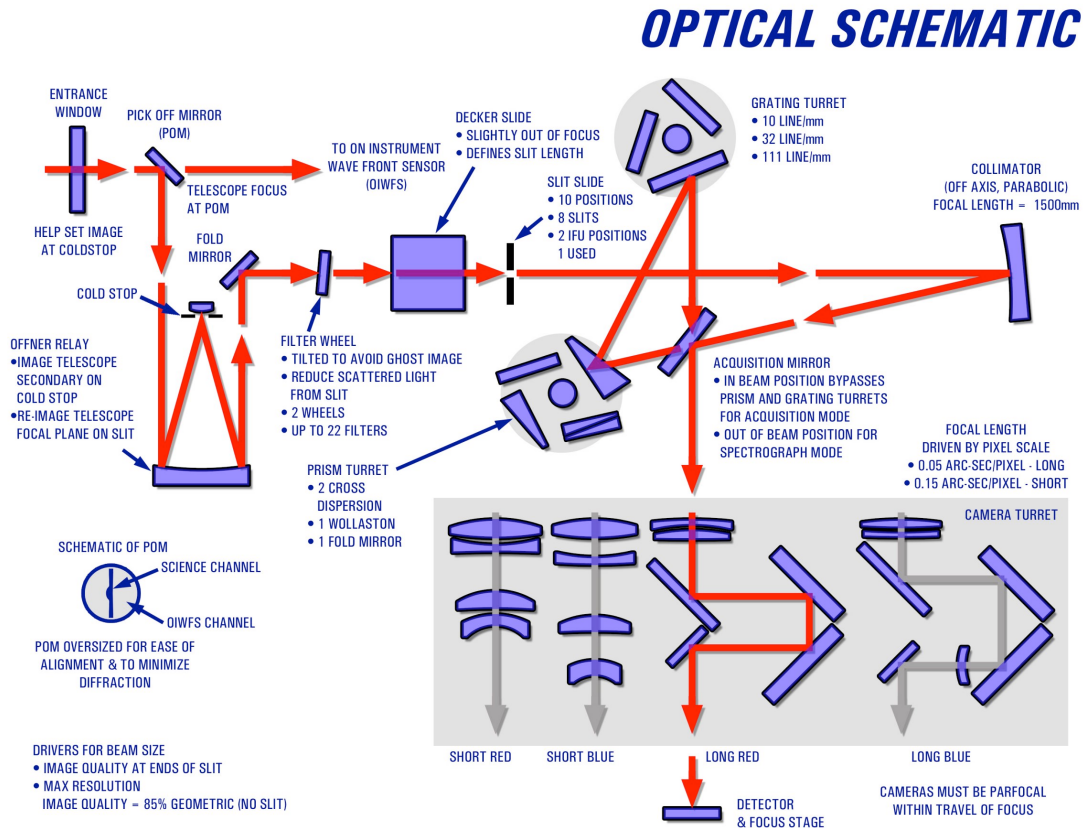


Figura 2.2: Esquema óptico do espectrógrafo GNIRS, utilizado para as observações no infravermelho próximo. Disponível em <https://www.gemini.edu/instrumentation/gnirs>.

2.1.3 Redução e preparação dos espectros

A redução dos dados foi previamente realizada com a versão 1.9 da *pipeline* XDG-NIRS, desenvolvida especificamente para o modo cross-dispersed do GNIRS e baseada no pacote IRAF/Gemini, conforme descrito em detalhes por [Mason et al. \(2015\)](#). A seguir, apresentamos um resumo das principais etapas envolvidas, com o intuito de contextualizar as análises deste trabalho².

O processo iniciou-se com a remoção de padrões eletrônicos fixos e eventos de radiação,

²A pipeline e sua documentação estão disponíveis em <http://drforum.gemini.edu/forums/gemini-data-reduction>

seguidos da divisão por *flats* obtidos com lâmpadas de quartzo e IR. A subtração do céu foi feita por pares de nodos, e os espectros bidimensionais foram retificados com *flats* de *pinhole* para corrigir a inclinação do detector. A calibração em comprimento de onda utilizou espectros de arco de argônio, e a extração dos espectros unidimensionais foi realizada ordem por ordem, com uma abertura de $1.8''$, aproximadamente o dobro do *seeing* médio no infravermelho. A correção de absorções telúricas (ver subseção 2.2.1) foi feita com estrelas padrão do tipo A0–A5, cujas linhas intrínsecas foram removidas por modelos ou ajustes empíricos. A tarefa `telluric` do IRAF foi utilizada para aplicar a correção, embora algumas regiões críticas (como em torno de $1.9\text{--}2.1\ \mu\text{m}$) permaneçam afetadas.

A calibração de fluxo assumiu espectros de corpo negro para as estrelas padrão, ajustados às magnitudes K_s do 2MASS. Diferenças de até 40% entre estrelas foram observadas, provavelmente devido a variações no *seeing* e na centralização dos alvos na fenda. Por fim, correções manuais foram aplicadas para alinhar ordens espectrais e remover artefatos residuais. Mesmo após o processamento, certas regiões espectrais continuam sujeitas à absorção atmosférica significativa, conforme discutido a seguir.

2.2 Especificidades de espectros no NIR

A análise espectral no infravermelho próximo apresenta desafios e características específicas que diferem significativamente da faixa óptica. Apesar de ser uma região especialmente útil para o estudo de regiões obscurecidas por poeira – como os núcleos galácticos ativos –, os espectros no NIR são mais sensíveis aos efeitos atmosféricos e contêm feições estelares distintas, que precisam ser cuidadosamente tratadas durante o processo de análise. Neste contexto, destacam-se dois fatores que afetam diretamente a interpretação dos espectros no NIR: (i) as regiões de forte absorção atmosférica, conhecidas como bandas telúricas, e (ii) a presença de bandas moleculares associadas a populações estelares evoluídas, que podem modificar o formato do contínuo.

2.2.1 Impacto das regiões telúricas na observação em NIR

Apesar das correções com estrelas padrão reduzirem os efeitos atmosféricos, algumas faixas espectrais permanecem severamente afetadas pela baixa transmissão da luz vinda do espaço pela absorção da atmosfera terrestre. As chamadas **bandas telúricas** correspondem a intervalos de comprimento de onda com baixa transparência, devido principalmente à presença de moléculas como H_2O , CO_2 e CH_4 . Nessas regiões, a absorção intensa compromete a qualidade dos dados, resultando em aumento do ruído e possível perda de sinal astrofísico relevante (Rudolf *et al.*, 2016). As absorções mais significativas ocorrem em torno de $14,000\ \text{\AA}$ e $19,000\ \text{\AA}$ (H_2O), $20,000\text{--}21,000\ \text{\AA}$ (CO_2) e $23,000\text{--}24,000\ \text{\AA}$ (CH_4).

Embora a absorção em $25,000 \text{ \AA}$ esteja fora das bandas J, H e K tradicionais, pode haver contaminação nas bordas do espectro devido ao CH_4 atmosférico.

A Figura 2.3 ilustra essas bandas no espectro da galáxia NGC 2273. As regiões sombreadas indicam os principais intervalos comprometidos pela absorção atmosférica, dificultando a análise de linhas de emissão e de características do contínuo. A linha pontilhada vermelha marca a posição da linha de emissão $\text{Pa}\alpha$ ($18,750 \text{ \AA}$), situada em uma das zonas mais críticas, o que frequentemente inviabiliza sua detecção em espectros com baixo sinal-ruído em fontes a baixo redshift.

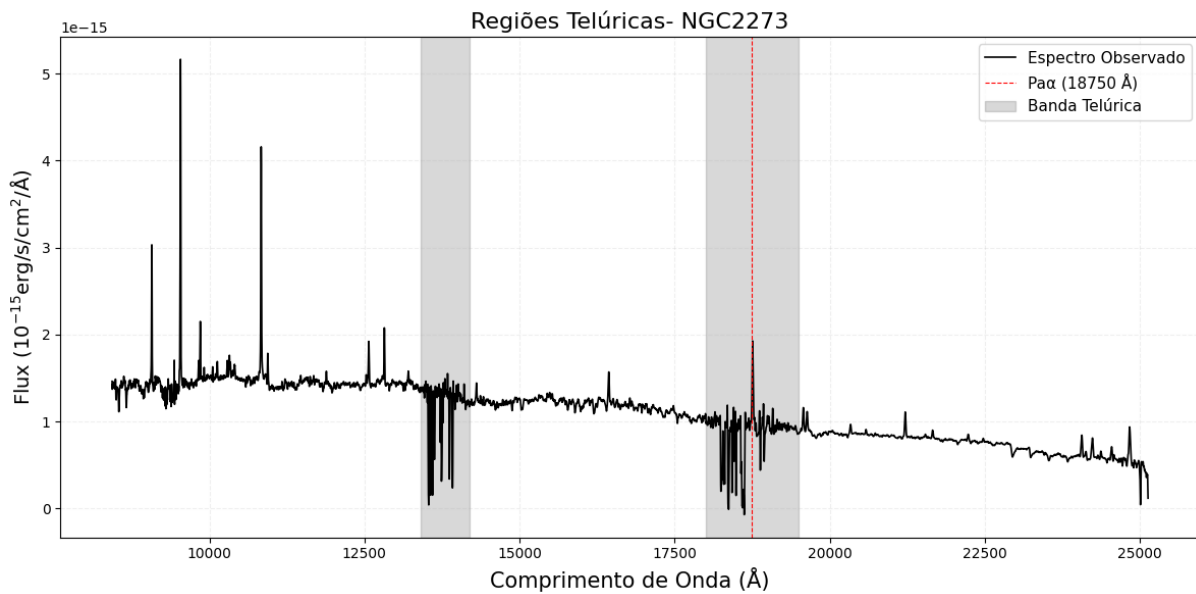


Figura 2.3: Espectro da galáxia NGC 2273 no infravermelho próximo. As regiões sombreadas indicam bandas telúricas, associadas à baixa transmissão atmosférica, principalmente devido à absorção por H_2O , CO_2 e CH_4 . A linha pontilhada vermelha marca a posição da linha de emissão $\text{Pa}\alpha$ ($18,750 \text{ \AA}$), situada dentro de uma dessas bandas. Fonte: Autora

Para mitigar o impacto da baixa transmissão atmosférica, as faixas espectrais mais afetadas foram mascaradas nas análises. Fora dessas regiões, os espectros apresentam qualidade suficiente para o cálculo de razões entre linhas de emissão, o foco principal deste trabalho.

Por fim, além da correção dos efeitos atmosféricos, outro passo essencial na preparação dos espectros é a remoção da contribuição estelar subjacente. Isso se faz necessário porque a emissão observada em uma galáxia resulta da combinação da luz das estrelas com componentes nebulares e, eventualmente, contribuições não térmicas de núcleos ativos. Para isolar com precisão as linhas de emissão e estudar os mecanismos de ionização do gás, é fundamental subtrair o espectro da contribuição estelar. Essa decomposição será realizada por meio de síntese espectral, como discutido na próxima seção.

2.2.2 Absorções no contínuo estelar

O contínuo estelar no infravermelho próximo apresenta uma contribuição significativa de estrelas frias, principalmente gigantes do tipo M e estrelas em fases evolutivas avançadas, como as da fase TP-AGB (do inglês, *Thermally Pulsating Asymptotic Giant Branch*). Nessa faixa espectral, o espectro integrado das galáxias exibe diversas feições de absorção molecular largas, sendo as bandas de CN e CO particularmente proeminentes. Essas absorções são originadas nas atmosferas estelares dessas estrelas frias, formadas pela superposição de várias transições vibracionais e rotacionais de moléculas, resultando em feições largas e complexas no espectro.

As bandas de CO ($\sim 1.56\text{--}1.65\mu\text{m}$ na banda *H* e $\sim 2.29\text{--}2.40\mu\text{m}$ na banda *K*) e de CN ($\sim 1.1\text{--}1.2\mu\text{m}$) estão associadas à presença de populações estelares evoluídas e são sensíveis à idade e à metalicidade da população. Sua identificação em espectros é uma ferramenta poderosa para distinguir populações estelares intermediárias e antigas, mesmo em regiões obscurecidas por poeira. A fase TP-AGB, em particular, contribui fortemente para o espectro integrado de populações com idades entre 0.2 e 2 Gyr, sendo fundamental para modelar corretamente o NIR (Maraston, 2005).

Na Figura 2.4, apresentamos os espectros NIR de quatro galáxias da amostra (NGC 2655, NGC 315, NGC 4750 e NGC 5005), com destaque para as regiões espectrais onde se localizam as principais bandas moleculares. As janelas espectrais utilizadas para medir a profundidade e largura equivalente das bandas estão realçadas em vermelho. À esquerda, observamos a banda de CN em $\sim 1.1\text{--}1.2\mu\text{m}$, enquanto as regiões centrais e à direita mostram as bandas de CO nas faixas *H* e *K*. A presença clara e sistemática dessas feições indica uma contribuição não desprezível de estrelas TP-AGB ou supergigantes vermelhas, sugerindo formação estelar relativamente recente ou em andamento nos núcleos dessas galáxias.

Essas bandas também são relevantes porque fornecem pistas sobre a composição química das estrelas. Por exemplo, a intensidade da banda de CN pode estar relacionada ao enriquecimento em nitrogênio, enquanto a de CO depende da abundância relativa de carbono e oxigênio na atmosfera estelar. Dessa forma, além de informarem sobre a idade estelar, essas feições também podem refletir o histórico químico da galáxia.

Outro aspecto importante é a vantagem do NIR sobre o óptico em termos de extinção por poeira. Como a absorção interestelar é significativamente menor no infravermelho, as bandas moleculares se tornam acessíveis mesmo em núcleos galácticos densamente obscurecidos. Isso permite investigar as regiões internas das galáxias, frequentemente inacessíveis em estudos ópticos, e detectar episódios de formação estelar recente que estariam encobertos em comprimentos de onda mais curtos.

A inclusão apropriada dessas feições nos modelos de síntese espectral é crucial. Modelos como os desenvolvidos por Maraston (2005) incluem explicitamente a fase TP-AGB,

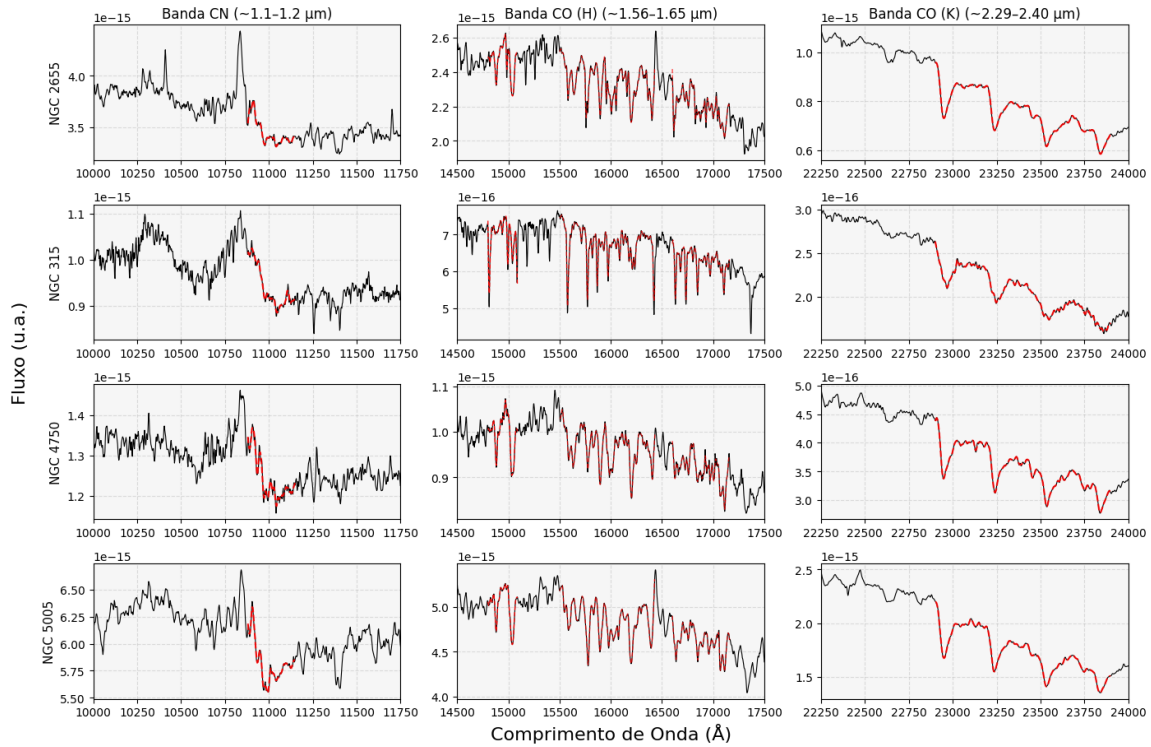


Figura 2.4: Zoom nas regiões espectrais associadas às bandas moleculares de CN e CO para quatro galáxias da amostra (NGC 2655, NGC 315, NGC 4750 e NGC 5005). À esquerda, é destacada a banda do CN em $\sim 1.1\text{--}1.2\ \mu\text{m}$, com uma curva suavizada (vermelha tracejada) para facilitar a visualização da absorção. Ao centro e à direita, vemos as bandas do CO nas janelas H ($1.56\text{--}1.65\ \mu\text{m}$) e K ($2.29\text{--}2.40\ \mu\text{m}$), respectivamente. A presença dessas bandas é um indicativo da contribuição de populações estelares jovens a intermediárias, principalmente em galáxias com histórico recente de formação estelar. Fonte: Autora

sendo mais adequados para descrever populações que dominam o NIR. A comparação dos nossos espectros observacionais com esses modelos revelou boa consistência entre as bandas de absorção previstas e observadas, reforçando a importância de utilizar modelos com tratamento detalhado das fases evolutivas avançadas.

Por fim, é importante destacar que a presença dessas bandas pode também introduzir desafios na decomposição espectral, especialmente em galáxias ativas. O contínuo NIR de um AGN pode se assemelhar ao de uma população estelar jovem, levando a degenerescências na síntese espectral (Riffel *et al.*, 2009). A interpretação cuidadosa das bandas moleculares, aliada à análise de outras feições espectrais e ao contexto morfológico da galáxia, é essencial para minimizar ambiguidades e obter resultados robustos.

Em resumo, a análise de espectros no NIR exige um tratamento cuidadoso das regiões contaminadas por absorção atmosférica e uma caracterização detalhada do contínuo estelar. Esses cuidados são essenciais para garantir a robustez das medições das linhas de emissão, que serão utilizadas para investigar os mecanismos de excitação do gás nas galáxias da amostra. A próxima seção descreve os métodos de síntese espectral empregados para modelar a contribuição estelar e isolar os componentes de emissão nebular.

2.3 Ajuste da População Estelar

2.3.1 Por que realizar a síntese estelar?

O espectro integrado de uma galáxia corresponde à soma da luz emitida por suas estrelas ao longo da linha de visada, acrescida de possíveis contribuições não estelares, como emissão nebular proveniente de regiões H II, remanescentes de supernova e, em alguns casos, núcleos ativos. Como o objetivo deste trabalho está centrado na análise das linhas de emissão associadas ao AGN e nos mecanismos de excitação do gás ionizado, torna-se essencial isolar essas componentes não estelares.

Para isso, empregamos a técnica de síntese espectral utilizando o código STARLIGHT³ (Cid Fernandes *et al.*, 2013, 2005; Cid Fernandes, 2018), que ajusta o espectro observado por meio de uma combinação de populações estelares simples (SSPs, do inglês *Single Stellar Population*) com diferentes idades e metalicidades. O resultado desse ajuste é um espectro sintético que representa unicamente a contribuição estelar. A subtração desse modelo do espectro observado produz um espectro residual que contém apenas as componentes não estelares, em especial as linhas de emissão. Essa etapa é crucial para garantir a medição precisa dos fluxos das linhas, minimizando contaminações que poderiam comprometer os diagnósticos físicos do gás. Embora o STARLIGHT também forneça estimativas de parâmetros estelares, como extinção, cinemática e frações luminosas das populações, tais resultados não foram explorados neste trabalho. O foco da síntese foi exclusivamente a subtração precisa do contínuo, de modo a garantir uma análise limpa das linhas de emissão.

Na faixa do infravermelho próximo, a escolha da base de SSPs é especialmente relevante. Utilizamos modelos que incorporam fases evolutivas fundamentais para o NIR, como a fase TP-AGB, que impacta significativamente o espectro de populações com idades entre 0,2 e 2 Gyr. A inclusão dessa fase permite reproduzir com maior fidelidade feições moleculares largas, como as bandas de CN e CO, previamente discutidas, assegurando um ajuste mais realista do contínuo estelar (Maraston, 2005; Riffel *et al.*, 2009).

2.3.2 Procedimentos para subtração do contínuo estelar

A modelagem do contínuo estelar é fundamental para a análise das linhas de emissão em espectros galácticos. Esta seção descreve as etapas realizadas, desde o pré-processamento dos espectros até a execução da síntese espectral propriamente dita, com foco na obtenção de espectros livres do contínuo estelar para posterior análise do gás ionizado.

- **Rebinagem espectral**

³<https://astro.ufsc.br/starlight/>

Para garantir compatibilidade com o STARLIGHT, os espectros observacionais foram reamostrados para apresentar uma escala linear em comprimento de onda, com espaçamento uniforme em angstroms. Essa condição é essencial para a correta aplicação da convolução gaussiana que simula o alargamento cinemático das estrelas, e para assegurar a consistência entre o espectro observado e a base de modelos utilizada. A rebinagem foi realizada com um passo fixo de $\Delta\lambda = 1\text{\AA}$, valor comumente adotado na literatura por facilitar a comparação entre diferentes espectros e modelos.

O processo de rebinagem foi implementado por meio de scripts desenvolvidos em Python, utilizando interpolação linear para redistribuir os dados ao longo de uma nova grade espectral. Esse procedimento não altera a resolução espectral original, mas garante uma amostragem homogênea do espectro, preservando sua forma global e minimizando a introdução de artefatos numéricos. Dessa forma, os espectros resultantes ficam adequadamente preparados para a etapa de síntese estelar.

- **Bases estelares**

A base de modelos de SSPs utilizada na síntese espectral é um dos elementos mais determinantes do resultado final. Ela define os parâmetros físicos disponíveis — como idade e metalicidade — e influencia diretamente a interpretação das propriedades estelares de uma galáxia (Cid Fernandes *et al.*, 2005; Riffel *et al.*, 2009). Uma base adequada deve cobrir uma ampla gama de idades e composições químicas, com resolução espectral suficiente para identificar as principais características dos espectros observados.

Neste trabalho, utilizamos duas bases estelares complementares, escolhidas de acordo com as propriedades espectrais e populacionais esperadas das galáxias LINERs da amostra: a base da E-MILES (Vazdekis *et al.*, 2016) e a base XSL (Verro *et al.*, 2022a,b). É importante destacar que ambas as bases incluem explicitamente a fase TP-AGB. Na E-MILES, essa contribuição é incorporada a partir das isócronas Padova00, enquanto na XSL está presente de forma empírica, por meio de espectros observados de estrelas TP-AGB.

Base E-MILES⁴: cobre o intervalo espectral de 1 680 a 50 000 Å, com resolução FWHM $\sim 2.5\text{\AA}$ na região óptica. Ela é construída a partir da junção de bibliotecas empíricas como NGSL (no UV), MILES (óptico), Indo-US, CaT e IRTF (infravermelho), oferecendo cobertura contínua do espectro com boa qualidade em diferentes faixas. Os modelos contemplam idades entre 30 Myr e 17.8 Gyr, e metallicidades de $[M/H] = -2.32$ a $+0.22$, com diversas opções de IMF. Neste trabalho, utilizamos a base `Base.E-Miles.KB.Padova`, que adota isócronas Padova+00 e a IMF de Kroupa Revised (KB) (Kroupa 2001), apropriada para populações dominadas por estrelas de baixa massa. A configuração escolhida contém

⁴Disponível em <https://research.iac.es/proyecto/miles/>

aproximadamente 50 idades e 7 valores de metalicidade, com boa resolução temporal e química para aplicações em galáxias evoluídas.

Base XSL⁵: complementando a base anterior, empregamos também os modelos derivados da *X-shooter Spectral Library* (XSL), que cobre de forma contínua a faixa espectral entre 3 000 e 24 800 Å, com resolução $R \sim 10\,000$ — permitindo análises homogêneas do UV ao NIR com uma única biblioteca. Essa base é especialmente útil na modelagem de espectros no infravermelho próximo, onde estrelas frias e gigantes dominam. Os modelos da base XSL-Kroupa PC foram gerados com isócronas PARSEC/COLIBRI e o código TRILEGAL (Girardi *et al.*, 2005), incluindo tratamento avançado de fases evolutivas como TP-AGB. A IMF adotada também é a de Kroupa (2001), e os modelos abrangem idades de 5×10^7 a 1.26×10^{10} anos e $[\text{Fe}/\text{H}]$ entre -0.6 e $+0.2$.

Como forma de visualizar a diversidade espectral modelada por essas bibliotecas, a Figura 2.5 apresenta exemplos de SSPs para diferentes idades, destacando as regiões espectrais cobertas por cada base.

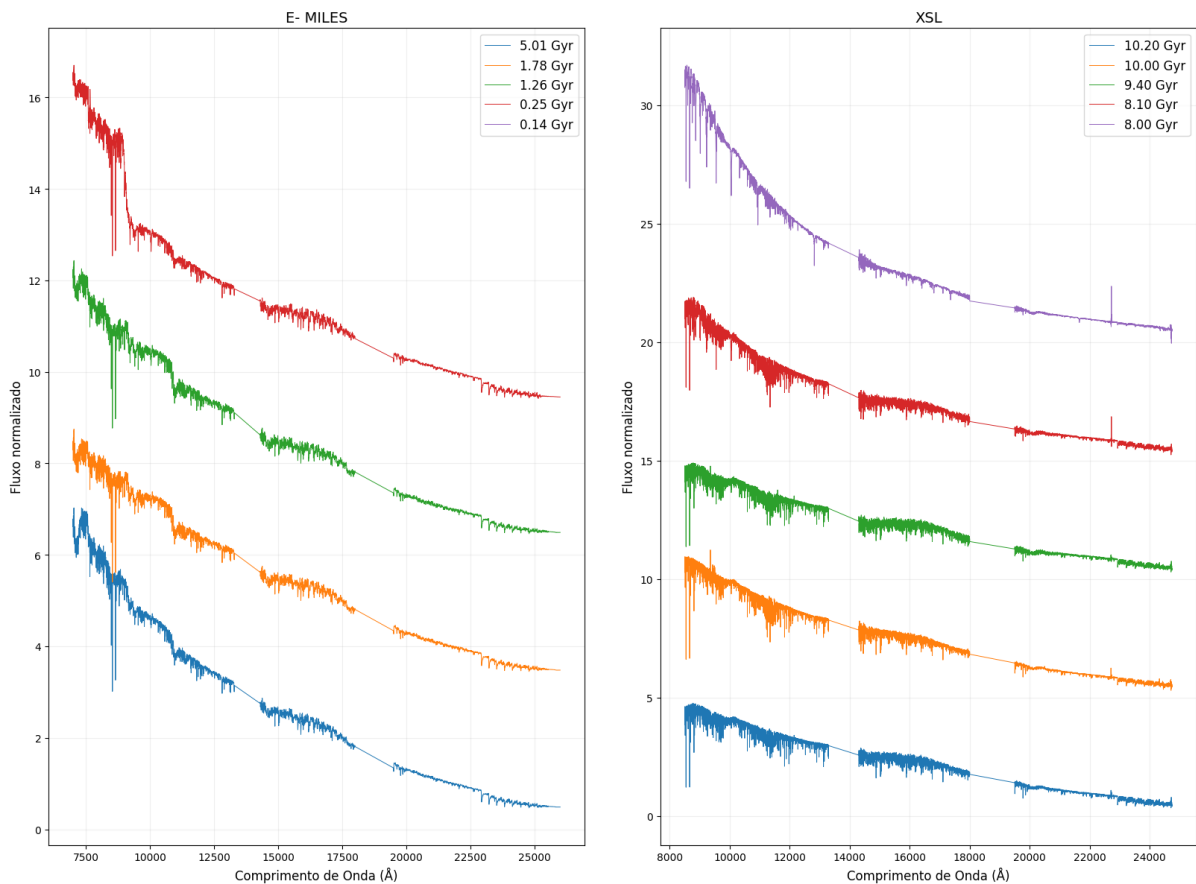


Figura 2.5: Exemplos de espectros de SSPs para diferentes idades, utilizando as bases E-MILES (à esquerda) e XSL-Kroupa PC (à direita). Os modelos foram normalizados e deslocados verticalmente para melhor visualização. As faixas cinzas indicam regiões com forte absorção telúrica. O eixo y está em unidades arbitrárias. Fonte: Autora

⁵Disponível em http://xsl.u-strasbg.fr/page_ssp.html

Justificativa da complementaridade: todos os objetos da amostra foram analisados separadamente com as bases E-MILES e XSL-Kroupa PC. A escolha combinada das bases E-MILES e XSL-Kroupa PC foi motivada pela busca de uma caracterização espectral mais abrangente das populações estelares presentes em galáxias do tipo LINER. A E-MILES cobre com riqueza de idades e metalicidades a região óptica, sendo particularmente adequada para modelar populações velhas com boa resolução espectral e densidade temporal. Já a XSL estende a análise ao infravermelho próximo com alta resolução e cobertura contínua do espectro, permitindo acesso a bandas moleculares sensíveis à presença de estrelas evoluídas. Assim, o uso combinado dessas bibliotecas visa integrar as forças de cada uma — a modelagem precisa no óptico e o detalhamento espectral no NIR — para uma análise mais completa e confiável da componente estelar nos núcleos LINERs.

Para facilitar a comparação entre as bibliotecas E-MILES e XSL, a Tabela 2.2 apresenta um resumo das suas principais propriedades espectrais e populacionais.

Tabela 2.2: Comparação entre as bases estelares E-MILES e XSL utilizadas na síntese espectral.

Característica	E-MILES (KB)	XSL
Faixa espectral	1680–50000 Å	3000–24800 Å
Resolução espectral	FWHM ~ 2.5 Å (óptico), menor resolução no NIR (IRTF)	$R \sim 10000$ (do UVB ao NIR)
Biblioteca empírica	MILES (óptico) + IRTF (NIR)	X-shooter Stellar Library (XSL)
Isócronas utilizadas	Padova+00	Padova+00
Modelos SSP	Vazdekis et al.	Verro et al.
Idades disponíveis (Gyr)	0.063 a 17.78 (44 idades)	0.0501 a 15.85
Metalicidades disponíveis (Z)	0.0001 a 0.03	0.00382 a 0.02409
IMF utilizada	Kroupa Revised (slope = 1.3)	Kroupa Universal (slope = 1.3)
Cobertura no NIR	Parcial (IRTF), menor resolução nas bandas H e K	Ampla e contínua com alta resolução J , H , K
Metalicidades utilizadas na amostra (Z)	0.0001, 0.0004, 0.001, 0.004, 0.008, 0.019, 0.03	0.00015, 0.00061, 0.00382, 0.01207, 0.01914, 0.02409
Idades utilizadas na amostra (Gyr)	0.5623, 0.6310, 0.7079, 0.8913, 1.0000, 1.2589, 1.5849, 1.7783, 1.9953, 2.2387, 2.32, 2.5119, 3.5481, 3.9811, 4.4668, 5.0119, 6.3096, 7.9433, 8.9125, 10.0000, 12.5893, 15.8489	0.0501, 0.0631, 0.0794, 0.1259, 0.1995, 0.2512, 0.3981, 0.5012, 0.6309, 0.7943, 1.0000, 1.5849, 2.5118, 3.1622, 3.9810, 5.0118, 6.3095, 7.9432, 10.0000, 12.5893, 15.8489
Total de SSP's	154	126

• Definição das máscaras espectrais

Para garantir a qualidade do ajuste espectral realizado pelo STARLIGHT, é fundamental restringir a análise às regiões que de fato contém características típicas de absorção estelar devida às das populações estelares. Isso é feito por meio da aplicação de máscaras espectrais, que atribuem diferentes pesos aos comprimentos de onda do espectro observado, com base em sua confiabilidade e relevância para o ajuste. A Figura 2.6 ilustra

esse procedimento para o caso da galáxia NGC 2273. As máscaras atuam diretamente na função de minimização utilizada pelo código, expressa por:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_{\lambda} - M_{\lambda})w_{\lambda}]^2, \quad (2.1)$$

em que O_{λ} é o espectro observado, M_{λ} é o modelo sintético gerado e w_{λ} representa o peso atribuído a cada comprimento de onda. Regiões afetadas por ruídos, linhas de emissão intensas ou absorções telúricas são atribuídas com peso nulo ($w_{\lambda} = 0$), sendo completamente ignoradas durante o ajuste. Por outro lado, intervalos com feições relevantes para a decomposição estelar podem receber pesos maiores (por exemplo, $w_{\lambda} = 2$), favorecendo sua influência na solução final. As demais regiões do espectro, não mascaradas e sem peso aumentado, recebem um peso padrão ($w_{\lambda} = 1$) e são igualmente utilizadas no ajuste.

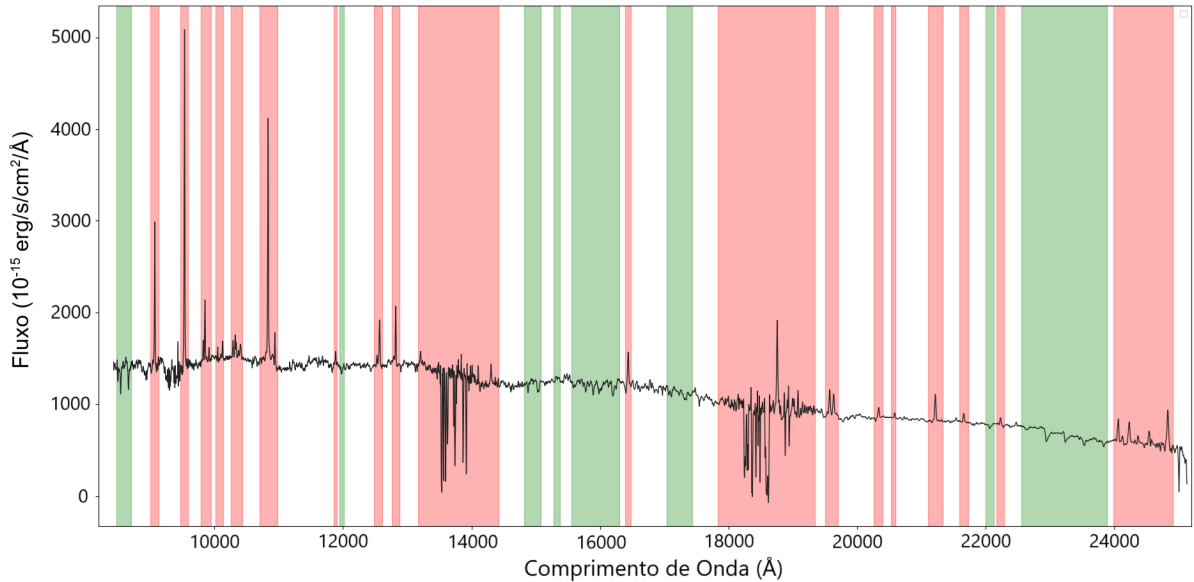


Figura 2.6: Exemplo de aplicação de máscaras espectrais no espectro da galáxia NGC 2273. As faixas vermelhas representam regiões com peso nulo ($w_{\lambda} = 0$), como linhas de emissão e bandas telúricas fortemente contaminadas. As faixas verdes indicam regiões com peso elevado ($w_{\lambda} = 2$), onde o ajuste é priorizado devido à presença de feições importantes, como bandas moleculares ou trechos com alta razão sinal-ruído. As regiões em branco receberam peso padrão ($w_{\lambda} = 1$) e também foram utilizadas no ajuste. Fonte: Autora

Neste trabalho, as máscaras foram construídas individualmente para cada espectro, levando em conta a posição das principais linhas de emissão e as regiões com forte contaminação atmosférica. As bandas telúricas mais críticas — entre 13,300–15,000 Å e 17,600–19,700 Å — foram sistematicamente mascaradas com peso zero, de modo a evitar que comprometessem o ajuste do contínuo estelar. Os arquivos de máscara seguem o padrão exigido pelo STARLIGHT, iniciando com o número total de intervalos definidos,

seguido por linhas contendo três colunas: o início, o fim do intervalo e o peso correspondente. Essa estrutura simples, porém flexível, permite adaptar com precisão a máscara às características específicas de cada galáxia da amostra. Essa etapa é fundamental para garantir a robustez e confiabilidade da síntese espectral, contribuindo diretamente para a acurácia dos parâmetros derivados — como a distribuição etária das populações estelares, a extinção interestelar e a cinemática do componente estelar.

• Componentes adicionais no modelo espectral

Durante a síntese espectral é necessário levar em conta efeitos que vão além da emissão estelar pura. Um deles é a extinção interestelar, causada pela presença de poeira ao longo da linha de visada, que atenua o espectro observado. Essa extinção é tratada no modelo assumindo uma distribuição uniforme de poeira, sendo quantificada pelo parâmetro de extinção visual A_V . A curva de extinção utilizada neste trabalho foi a de [Cardelli et al. \(1989a\)](#), conhecida como lei de CCM, amplamente adotada por sua aplicabilidade a ambientes galácticos com poeira moderada.

Além disso, o código STARLIGHT permite a inclusão de componentes espectrais não estelares, fundamentais para modelar corretamente espectros de galáxias com núcleos ativos. Uma dessas componentes é o chamado *featureless continuum* (FC), uma emissão contínua sem linhas associada ao processo de acreção ao redor do buraco negro supermassivo. Esse contínuo é tipicamente representado por uma lei de potência como na Equação 2.2 ([Koski, 1978](#)), onde α é o índice espectral em frequência. Como os ajustes deste trabalho foram realizados no infravermelho próximo (0,8–2,4 μm), é conveniente expressar a dependência espectral em função do comprimento de onda, obtendo a relação:

$$f_\lambda \propto \lambda^{-\alpha} \quad (2.2)$$

Essa transformação permite traduzir os valores de α comumente usados na literatura para o espaço de comprimento de onda. Por exemplo, uma inclinação espectral típica de $\alpha = 1.5$ implica um espectro em λ com dependência $f_\lambda \propto \lambda^{0.5}$. A Tabela 2.3 resume essa conversão para diferentes valores de α .

Tabela 2.3: Relação entre expoentes da componente FC em função de ν e λ .

α (em $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$)	α' (em $f_\lambda \propto \lambda^{\alpha'}$)	Interpretação
1.25	0.75	inclinação moderada
1.50	0.50	valor típico em AGNs
1.75	0.25	espectro mais plano em λ

Além disso, a Figura 2.7 ilustra o comportamento espectral da componente FC para diferentes índices espectrais, destacando como o formato do contínuo varia em função do expoente adotado. Todas as curvas foram normalizadas em $\lambda = 12000 \text{ \AA}$.

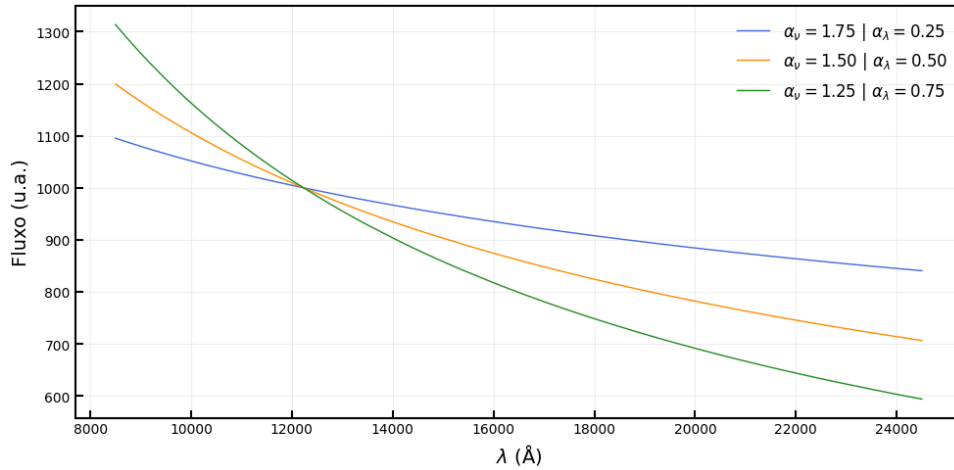


Figura 2.7: Curvas representativas do contínuo não estelar (FC) para diferentes valores do índice espectral α na expressão $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$. Nota-se que espectros com α maiores apresentam um decaimento mais acentuado em ν e, portanto, espectros mais planos em função de λ . A escala no eixo y está em unidades arbitrárias. Fonte: Autora.

Nos modelos utilizados neste trabalho, também foram incluídas contribuições térmicas associadas à emissão de poeira quente, especialmente relevante na região do infravermelho.

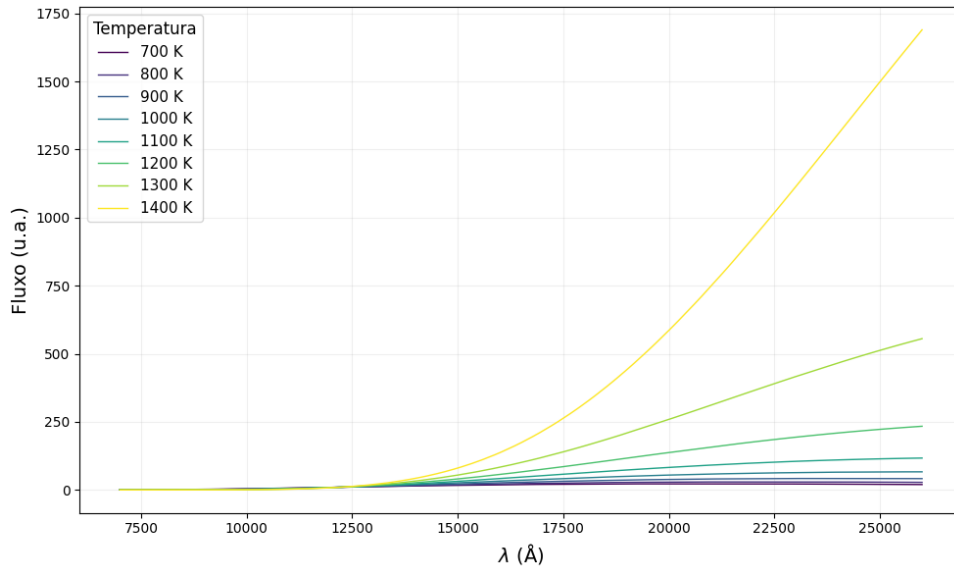


Figura 2.8: Distribuições espectrais de energia para corpos negros com diferentes temperaturas, representando a emissão térmica de poeira quente. No contexto de galáxias com núcleos ativos, curvas como essas são utilizadas para modelar a contribuição infravermelha da poeira aquecida pela radiação do AGN ou por regiões de formação estelar intensa. Fonte: Autora.

Essa emissão foi modelada por curvas de corpo negro com diferentes temperaturas típicas, ilustradas na Figura 2.8. A inclusão dessa componente permite representar adequadamente a radiação proveniente de regiões nucleares com alta concentração de poeira aquecida pela fonte central.

- **Configuração do `grid.in`**

Após a preparação dos espectros e dos componentes necessários (como a rebinagem, a definição das bases estelares, as máscaras espectrais e a inclusão de componentes adicionais), o próximo passo consistiu na configuração do arquivo `grid.in`, responsável por reunir os principais parâmetros que controlam o ajuste espectral realizado pelo STARLIGHT.

Esse arquivo define, entre outras informações, os limites espectrais utilizados no ajuste, que foram escolhidos de modo a excluir faixas fortemente afetadas por ruído, absorção telúrica ou artefatos instrumentais, garantindo que apenas regiões confiáveis fossem utilizadas na síntese. A faixa de normalização foi fixada entre 12,200 e 12,260 Å, intervalo livre de linhas de emissão e com razão sinal-ruído elevada na maioria dos espectros. Essa escolha permite calibrar o nível do contínuo com maior precisão, facilitando a comparação entre o modelo e os dados observacionais.

Abaixo estão listados os principais parâmetros definidos no arquivo `grid.in` utilizados para o processamento dos espectros no infravermelho próximo:

Tabela 2.4: Parâmetros utilizados no arquivo `grid.in`.

Parâmetro	Descrição
48	Número total de ajustes espectrais a serem realizados.
<code>/caminho/para/a/base/</code>	Diretório contendo a base espectral utilizada na síntese.
<code>/caminho/para/espectros/</code>	Diretório com os espectros observacionais.
<code>/caminho/para/mascaras/</code>	Caminho para os arquivos de máscara espectral.
<code>/caminho/para/saida/</code>	Diretório onde os resultados serão armazenados.
1234567	Valor usado como semente para números aleatórios.
12200.0 - 12260.0	Intervalo para normalização e cálculo da S/N.
8500.0 - 24000.0	Faixa usada no ajuste (inclui o NIR).
1.0	Passo espectral (em Å) adotado no ajuste.
1.0	Fator multiplicativo aplicado ao cálculo do χ^2 .
FIT	Cinemática será ajustada (usar FFK p/ fixar).
0	Sem espectros de erro (<code>IsErrSpecAvailable</code>).
0	Sem espectros com flags (<code>IsFlagSpecAvailable</code>).

Essas configurações foram ajustadas para contemplar a faixa espectral do infravermelho próximo, compatível com as SSPs utilizadas, e foram aplicadas uniformemente a todos os espectros processados.

2.3.3 Execução do código

A execução do STARLIGHT foi realizada utilizando uma versão modificada do executável `StarlightChains.exe`, previamente adaptada para lidar com espectros extensos no

infravermelho, contendo até 25.000 pontos espectrais. Essa versão já otimizada foi fornecida por colaboradores e permite o processamento de espectros maiores do que os típicos do regime óptico, sem exigir modificações adicionais por parte deste trabalho.

O código busca o melhor ajuste entre o espectro observado O_λ e o modelo sintético M_λ , por meio da minimização da função χ^2 (ver Equação 2.1), em que w_λ é o peso atribuído a cada ponto espectral. Em geral, esse peso é inversamente proporcional ao erro associado ($w_\lambda = 1/\sigma_\lambda$), sendo definido pelas máscaras espectrais que permitem ignorar regiões contaminadas por ruído, linhas de emissão ou absorções atmosféricas. A minimização do χ^2 corresponde à maximização da verossimilhança sob a suposição de que os erros nas observações seguem uma distribuição normal e são estatisticamente independentes.

O modelo sintético M_λ representa o espectro modelado de uma galáxia, ou seja, o fluxo total previsto em cada comprimento de onda λ reconstruído a partir da combinação de populações estelares simples. Esse modelo é normalizado por M_{λ_0} , o valor do modelo em um comprimento de onda de referência λ_0 , utilizado para garantir que os espectros da base estelar estejam todos na mesma escala relativa. A forma geral do modelo é:

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \sum_{j=1}^{N_*} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \otimes G(v_*, \sigma_*), \quad (2.3)$$

em que x_j são as frações de luz de cada SSP na base, $b_{j,\lambda}$ são os espectros normalizados, r_λ é o termo de extinção baseado na lei de [Cardelli *et al.* \(1989a\)](#), e $G(v_*, \sigma_*)$ representa a função gaussiana que incorpora os efeitos da cinemática estelar por meio da velocidade média v e da dispersão σ . A otimização é realizada por métodos probabilísticos, como o algoritmo de Metropolis-Hastings e a amostragem por cadeias de Markov, combinados com técnicas que favorecem a exploração global do espaço de parâmetros. Isso assegura uma busca eficiente por soluções compatíveis com os dados, minimizando a chance de aprisionamento em mínimos locais.

Resumidamente, o STARLIGHT segue uma sequência organizada de etapas para garantir um bom ajuste espectral. A execução do código é feita diretamente no terminal, utilizando o seguinte comando: `./StarlightChains_v04RR_25klines_1000Base.exe < grid.in`. Primeiro, realiza uma varredura ampla no espaço de parâmetros, testando diversas combinações de populações estelares — inclusive as menos prováveis. Em seguida, ignora regiões espectrais que se desviam muito do modelo inicial, como áreas com ruído elevado, bandas telúricas ou linhas de emissão intensas. A partir dos pontos mais confiáveis, o ajuste é então refinado com o uso completo da base espectral. Por fim, o código repete esse processo de forma iterativa, descartando automaticamente componentes com contribuição desprezível (frações de luz nulas), o que leva a uma solução final mais enxuta e representativa das propriedades físicas da população estelar observada.

Como resultado, o STARLIGHT retorna o espectro sintético ajustado (Figura 2.9), os vetores de população estelar, os parâmetros de extinção e cinemática estelar, além dos

resíduos do ajuste, que podem ser usados para avaliar a qualidade da síntese espectral.

A robustez dos resultados obtidos com o STARLIGHT depende significativamente da base espectral adotada. A seguir, são comparadas as sínteses realizadas com duas bibliotecas distintas — E-MILES e XSL — a fim de avaliar como a escolha da base influencia os parâmetros estelares derivados e a qualidade do ajuste.

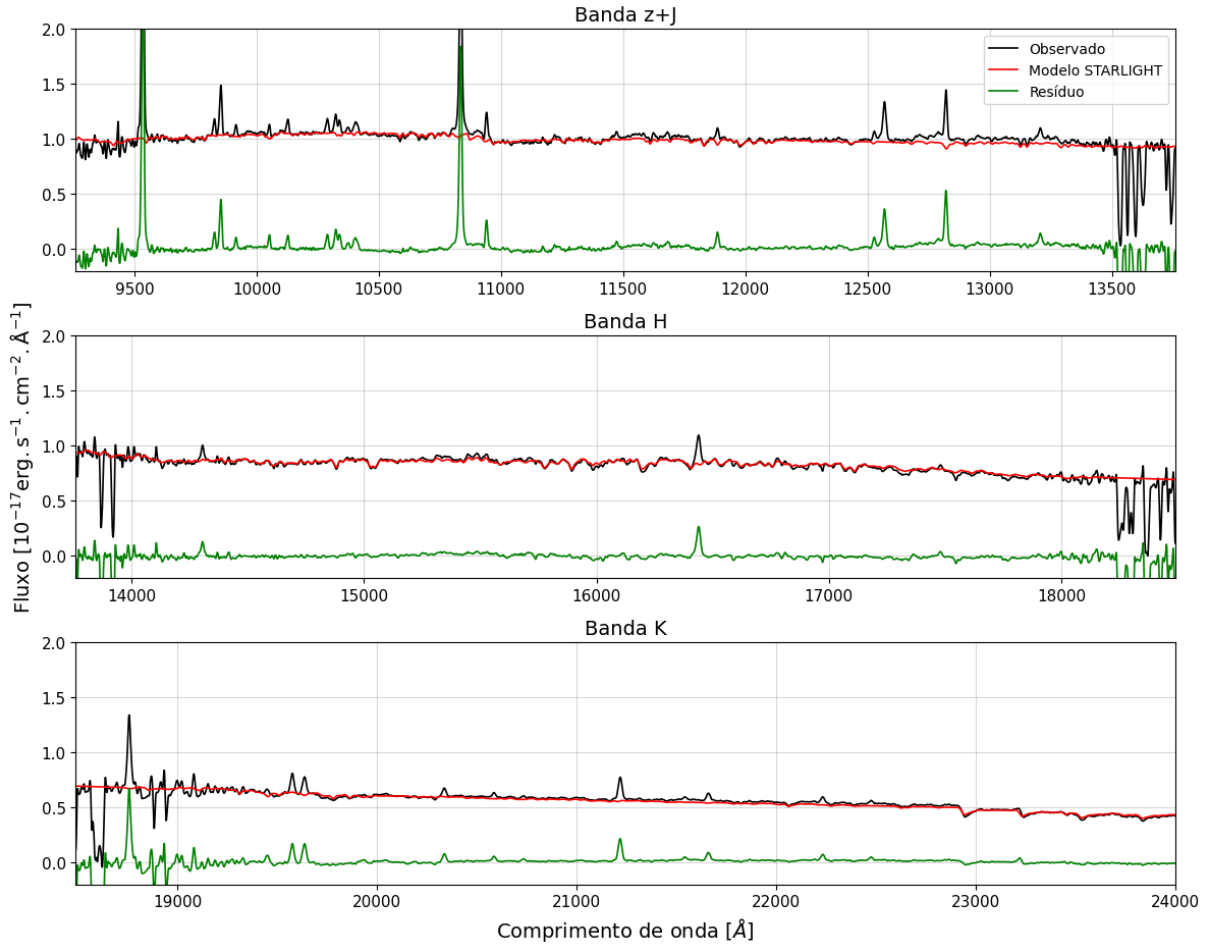


Figura 2.9: Exemplo de resultado da síntese espectral com o STARLIGHT referente à galáxia NGC 2273 da amostra. O painel superior mostra o ajuste na região das bandas $z + J$, o painel central corresponde à banda H e o inferior à banda K . Em cada painel, o espectro observado está em preto, o modelo sintético ajustado em vermelho e os resíduos (diferença entre observado e modelo) em verde. Fonte: Autora.

2.3.4 Ajuste da população estelar com a base E-MILES

A Figura 2.10 apresenta os resultados da síntese espectral, como exemplo, as galáxias NGC 5273 e NGC 5005 utilizando a base estelar E-MILES, processados com o código em Python PYLIGHT, desenvolvido por colaboradores. No painel superior de cada conjunto, observa-se o espectro observado (linha preta) e o espectro ajustado pelo modelo (linha vermelha). Abaixo, o painel de resíduos mostra a diferença entre o espectro observado e o modelo ajustado (linha preta), juntamente com as regiões mascaradas (em magenta), que

incluem linhas de emissão e bandas telúricas. O modelo sintetizado conseguiu reproduzir bem o contínuo espectral, mesmo em regiões afetadas por absorção e baixa razão sinal-ruído.

Na segunda linha de cada conjunto, são apresentados três gráficos que descrevem a composição estelar derivada da síntese. O primeiro gráfico mostra a contribuição das populações estelares em função da idade: a fração de luz (linha azul) e a fração de massa (linha vermelha tracejada). Nota-se a predominância de populações com idades acima de $> 10^9$ anos, especialmente na contribuição em massa.

O segundo gráfico mostra a distribuição da contribuição em luz das populações estelares em função da idade e da metalicidade. Observa-se que, para a galáxia NGC 5005, a maior parte da luz é emitida por populações com metalicidade relativamente alta, próximas de $0,4 Z_{\odot}$, indicando formação estelar em um ambiente já enriquecido quimicamente. Essas diferenças indicam históricos distintos de evolução química entre as duas galáxias, sendo que a NGC 5005 provavelmente passou por episódios de formação estelar mais eficientes ou prolongados, permitindo maior reciclagem de material enriquecido por gerações anteriores de estrelas. Em contraste, na NGC 5273, a contribuição dominante em luz provém de populações com metalicidade significativamente mais baixa, em torno de $0,02 Z_{\odot}$, sugerindo que as estrelas formadas nesta galáxia se originaram em um meio menos enriquecido.

É importante notar também a presença marcante da cor amarela nos histogramas, principalmente nas regiões de idade intermediária a avançada. Essa coloração corresponde a populações estelares com metalicidade superior à solar (entre $1 - 1.5 Z_{\odot}$). Assim, a presença significativa dessa faixa indica que uma fração relevante da luz emitida provém de populações bastante enriquecidas, reforçando a interpretação de que parte das estrelas se formou após um processo químico considerável no meio interestelar.

O terceiro gráfico agrupa a contribuição estelar em quatro faixas etárias: populações jovens (xy), intermediárias-jovens (xiy), intermediárias-velhas (xio) e velhas (xo). A síntese aponta que a maior parte da população estelar pertence a esta última categoria (xo). Por fim, os dois últimos gráficos apresentam as componentes não estelares da base: a fração de contribuição do contínuo de potência (FC), associado à emissão do disco de acreção do AGN, e a contribuição do corpo negro, relacionada à emissão de poeira quente. Para ambas as galáxias, essas componentes mostraram contribuição nula ou desprezível, consistente com a baixa ou moderada atividade nuclear observada.

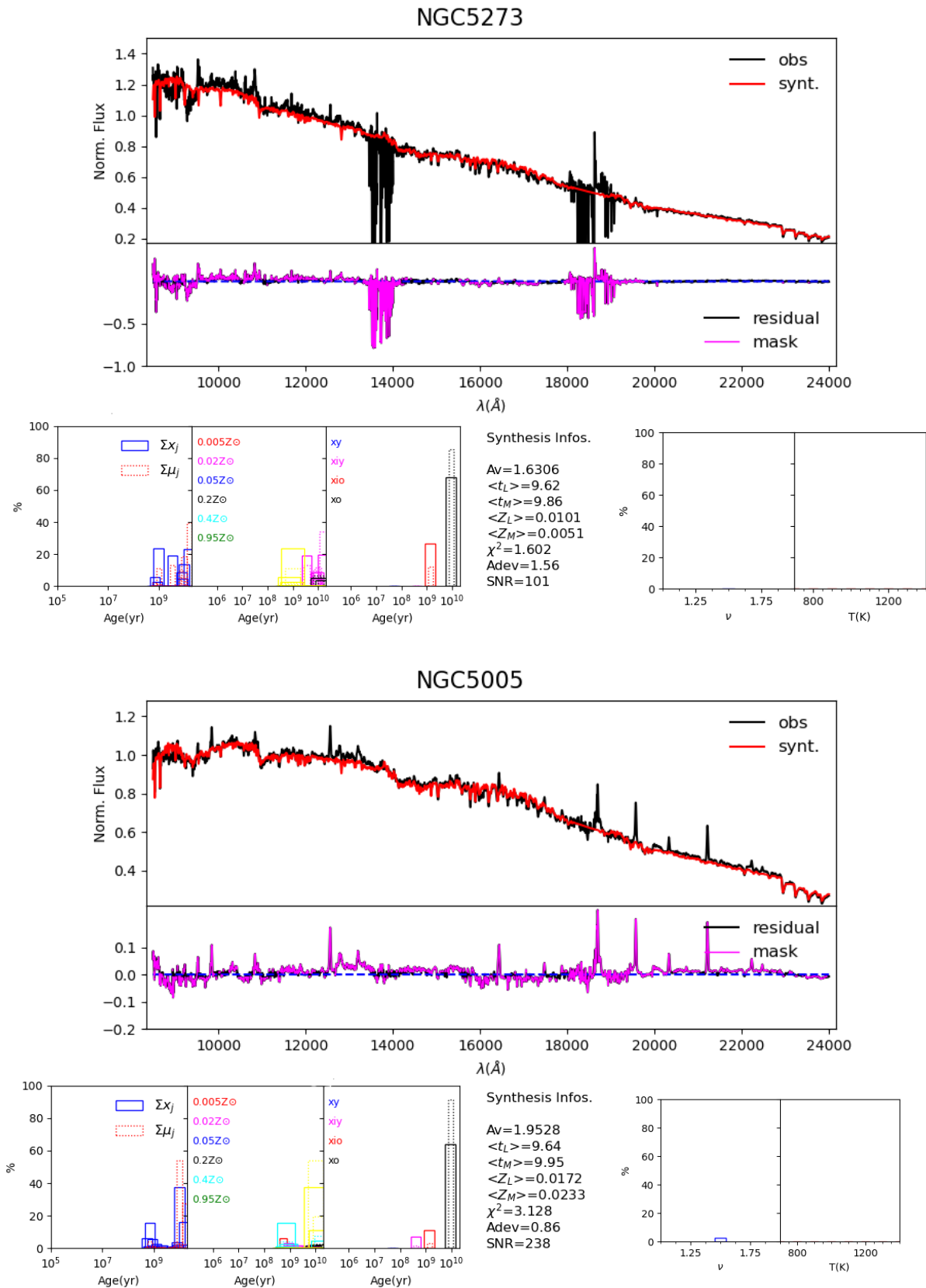


Figura 2.10: Resultado da síntese espectral das galáxias NGC 5273 e NGC 5005, obtido com a base estelar E-MILES utilizando o código PYLIGHT. Figura adaptada pela autora.

2.3.5 Ajuste da população estelar com a base XSL

A Figura 2.11 apresenta os resultados da síntese espectral para as galáxias NGC 5273 e NGC 5005 utilizando a base estelar XSL. As SSPs desta base são derivadas a partir de interpolações das bibliotecas IRTF e E-IRTF, que apresentam limitações quanto à cobertura em temperatura efetiva, resultando na ausência de estrelas quentes. Isso compromete a representação adequada de populações estelares muito jovens, cuja emissão é dominada por essas estrelas.

Como consequência, a síntese com essa base pode apresentar um viés, com soluções favorecendo idades intermediárias em detrimento de populações mais jovens, o que pode afetar a interpretação da história de formação estelar da galáxia. Apesar disso, a base XSL oferece excelente cobertura para estrelas frias e de tipos espectrais tardios (como K e M), o que é particularmente vantajoso para representar o espectro no infravermelho próximo. Ainda que a amostragem limitada de estrelas quentes possa restringir a modelagem de populações jovens, os resultados revelaram uma predominância de populações estelares velhas em grande parte da amostra, mesmo quando utilizadas SSPs baseadas na XSL.

Os ajustes realizados com ambas as bases estelares apresentaram boa qualidade, reproduzindo adequadamente os espectros observados das galáxias da amostra. As regiões características de absorção — em especial as bandas de CO no infravermelho próximo — foram bem representadas pelos modelos sintetizados, evidenciando a eficácia das bibliotecas na reconstrução do contínuo espectral. As máscaras aplicadas, preparadas individualmente para cada galáxia, também se mostraram eficazes, excluindo com precisão regiões contaminadas por linhas de emissão ou artefatos, sem comprometer o ajuste global.

Embora tenham sido identificadas tendências populacionais (como a predominância de populações estelares velhas), essas informações são interpretadas apenas no contexto da qualidade do ajuste espectral, não sendo o foco central desta pesquisa. O principal objetivo desta etapa permanece o de garantir a confiabilidade necessária para a medição precisa dos fluxos das linhas de emissão, conforme será discutido nas seções seguintes.

A escolha do melhor ajuste para cada galáxia foi feita com base em critérios quantitativos, como o desvio absoluto médio (*Adev*) e o valor do χ^2 reduzido, aliados a uma inspeção visual cuidadosa dos espectros ajustados. Assim, entre as duas bases utilizadas (E-MILES e XSL), foi selecionada, para cada caso, aquela cujo modelo apresentou o melhor desempenho, assegurando maior confiabilidade para as análises subsequentes. Com os espectros estelares devidamente ajustados e subtraídos, foi então possível realizar o próximo passo da análise: o ajuste das linhas de emissão, descrito na seção a seguir.

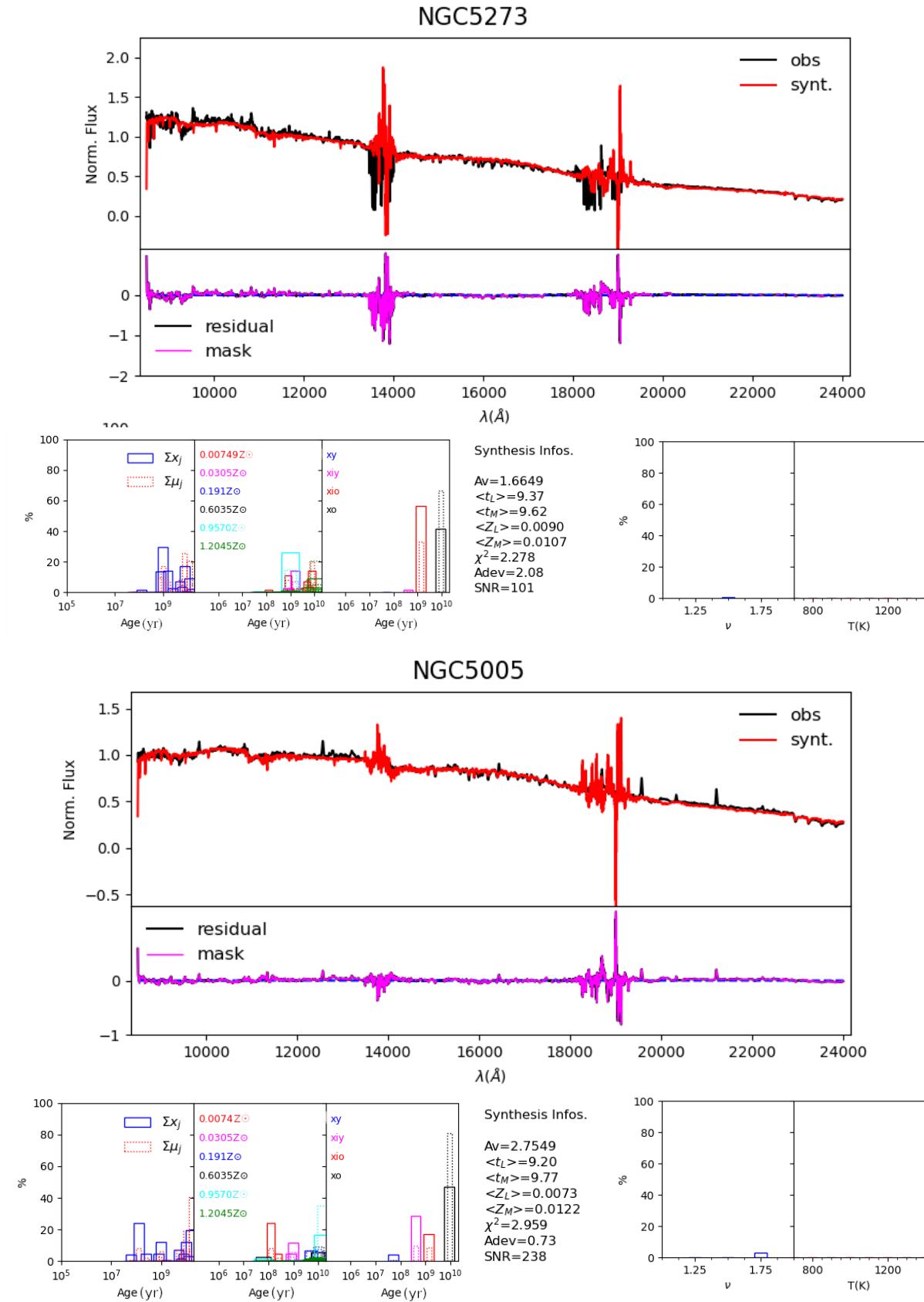


Figura 2.11: Resultado da síntese espectral das galáxias NGC 5273 e NGC 5005, obtido com a base estelar XSL utilizando o código PYLIGHT. Figura adaptada pela autora.

2.4 Ajuste de Linhas de Emissão com PYSPECKIT

Após a subtração do contínuo estelar com o código STARLIGHT, os espectros residuais foram utilizados para a análise quantitativa das linhas de emissão, agora majoritariamente livres do contínuo produzido pela população estelar, a fonte central e a poeira quente. Para quantificar as propriedades físicas do gás ionizado, empregou-se a biblioteca `pyspeckit` (Ginsburg e Mirocha, 2011), desenvolvida em Python e amplamente utilizada na espectroscopia astronômica. Essa ferramenta permite o ajuste de perfis de linha com diferentes modelos analíticos (como gaussianas, lorentzianas e perfis de Voigt), além de oferecer funcionalidades para análise de resíduos, cálculo de parâmetros espectrais e manipulação interativa dos dados (Ginsburg *et al.*, 2022).

2.4.1 Preparação dos espectros e definição do ajuste

Nesta análise, adotou-se o modelo de ajuste gaussiano para descrever as linhas de emissão no infravermelho próximo. Inicialmente, realizou-se uma inspeção visual de cada espectro em janelas espectrais específicas, centradas nas linhas de interesse. Essa seleção criteriosa restringiu o intervalo de comprimento de onda (x -axis) ao entorno imediato da linha analisada, minimizando a inclusão de ruído excessivo ou de contaminações por outras transições próximas.

Definido o intervalo espectral, ajustou-se a linha de base por meio de um polinômio de primeiro grau, considerando apenas as regiões adjacentes à linha de emissão e excluindo sua porção central. Essa abordagem, realizada com o método `baseline` do `pyspeckit` (que ajusta a função polinomial às regiões identificadas como livres de contaminação), forneceu uma estimativa mais fiel ao nível real do contínuo local, reduzindo o viés do ajuste e contribuindo para a extração precisa dos parâmetros espectrais.

2.4.2 Estimativas iniciais e critérios para múltiplas componentes

O ajuste das linhas de emissão começa com a definição de estimativas iniciais para os parâmetros das componentes gaussianas, por meio do argumento `guesses`. Essas estimativas atuam como “palpites iniciais” para os valores de amplitude, posição central e largura (`sigma`) de cada gaussiana, sendo essenciais para orientar o algoritmo de otimização durante o processo não linear. Para estabelecer esses valores iniciais de forma fundamentada, utilizou-se o software IRAF como ferramenta auxiliar. A partir da inspeção visual do espectro, foi possível identificar os limites da linha, sua altura (relacionada à amplitude) e sua largura em angstroms, permitindo assim a construção de um conjunto inicial de parâmetros realistas para cada componente a ser ajustada.

A escolha do número de componentes gaussianas para o ajuste de cada linha foi guiada por uma análise detalhada do perfil espectral e, principalmente, pela avaliação dos resíduos

do ajuste inicial. Começou-se ajustando uma única gaussiana; se os resíduos indicavam padrões sistemáticos — como oscilações, assimetrias ou múltiplos picos —, adicionou-se uma segunda componente para melhor representar o perfil. Em casos de perfis complexos, com subestruturas ou sobreposição de linhas vizinhas, utilizou-se até três componentes. A inclusão de cada componente adicional foi sempre respaldada por melhorias significativas no ajuste e coerência física. A Figura 2.12 apresenta exemplos desses ajustes, mostrando tanto a modelagem com uma única gaussiana quanto com múltiplas componentes.

Em casos simples — como linhas isoladas e simétricas — um único grupo de três parâmetros era suficiente: `guesses = [A, center, sigma]`. Para perfis mais complexos, envolvendo subestrutura, assimetrias ou múltiplas componentes cinemáticas, empregaram-se múltiplas gaussianas. Nesses casos, o vetor `guesses` incluía um conjunto de três parâmetros para cada componente: `guesses = [A1, center1, sigma1, A2, center2, sigma2]`. A escolha apropriada dessas estimativas foi essencial para assegurar a convergência adequada do ajuste, evitando soluções não físicas ou espúrias.

Importante destacar que, para manter consistência física e facilitar a interpretação, o número de componentes gaussianas definido para uma linha foi rigidamente aplicado às demais linhas do mesmo íon. Ou seja, se a linha $\text{Pa}\beta$ foi modelada com duas componentes, nenhuma outra linha dessa série, como a $\text{Pa}\gamma$, poderia apresentar mais do que duas componentes. Essa restrição assegura que todas as transições estejam representando a mesma estrutura cinemática do gás emissor, evitando interpretações discrepantes ou incoerentes entre os ajustes das diferentes linhas.

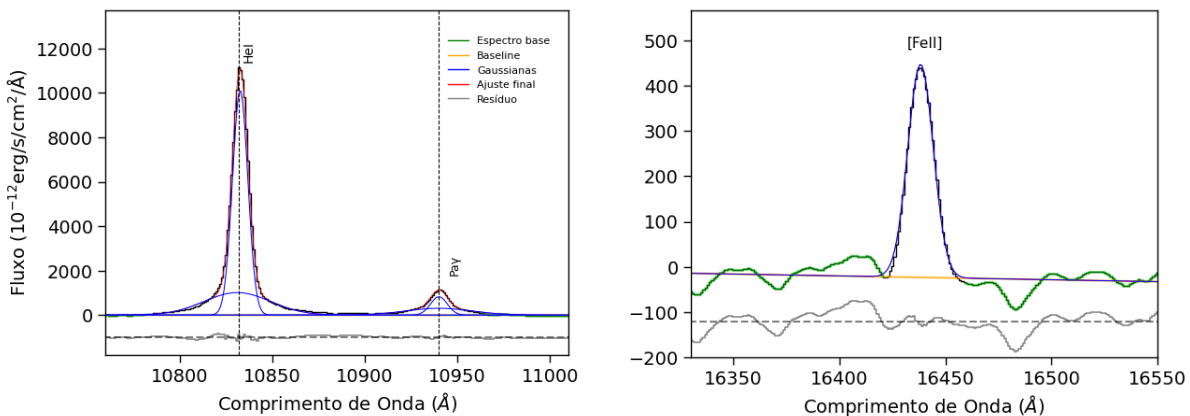


Figura 2.12: Exemplos de ajustes de componentes gaussianas para a galáxia NGC 4395. O espectro observado (preto) é ajustado por uma combinação de componentes: o contínuo de base (verde), a linha de base local (amarela), as componentes gaussianas individuais (azul) e o ajuste final completo (vermelho). A curva residual (cinza) representa a diferença entre o espectro observado e o modelo ajustado. As linhas verticais tracejadas marcam a posição central esperada das linhas de emissão. No painel esquerdo, a linha de He I $1.083\mu\text{m}$ e $\text{Pa}\gamma$ $1.094\mu\text{m}$ ajustadas com duas gaussianas (componente larga e estreita). No painel direito, a linha de $[\text{Fe II}]$ $1.643\mu\text{m}$ ajustada com apenas uma gaussiana.

2.4.3 Imposição de Vínculos Físicos: o argumento `tied`

Além da definição dos valores iniciais, o `pyspeckit` permite a imposição de vínculos entre os parâmetros das componentes ajustadas, por meio do argumento `tied`. Esse recurso aceita expressões condicionais baseadas em outros parâmetros do modelo e é especialmente útil para incorporar vínculos físicos conhecidos ao ajuste, como razões de intensidade fixas e separações espectrais bem definidas, referenciando os índices correspondentes no vetor de parâmetros.

Entre os vínculos mais utilizados, destacam-se: a vinculação entre amplitudes (por exemplo, $A_2 = 0,5 \cdot A_1$), a imposição de separações espectrais fixas (como $\lambda_2 = \lambda_1 - 30 \text{ \AA}$) e a igualdade entre larguras ($\sigma_2 = \sigma_1$). Como exemplo, considere o ajuste simultâneo das linhas $[\text{Fe II}] 1.257\mu\text{m}$ e $\text{Pa}\beta 1.282\mu\text{m}$, no qual a componente estreita da $\text{Pa}\beta$ é forçada a ter a mesma largura que a linha $[\text{Fe II}]$, assumindo que ambas sejam emitidas pela mesma região gasosa. Um exemplo da aplicação desse recurso é apresentado na Figura 2.13.

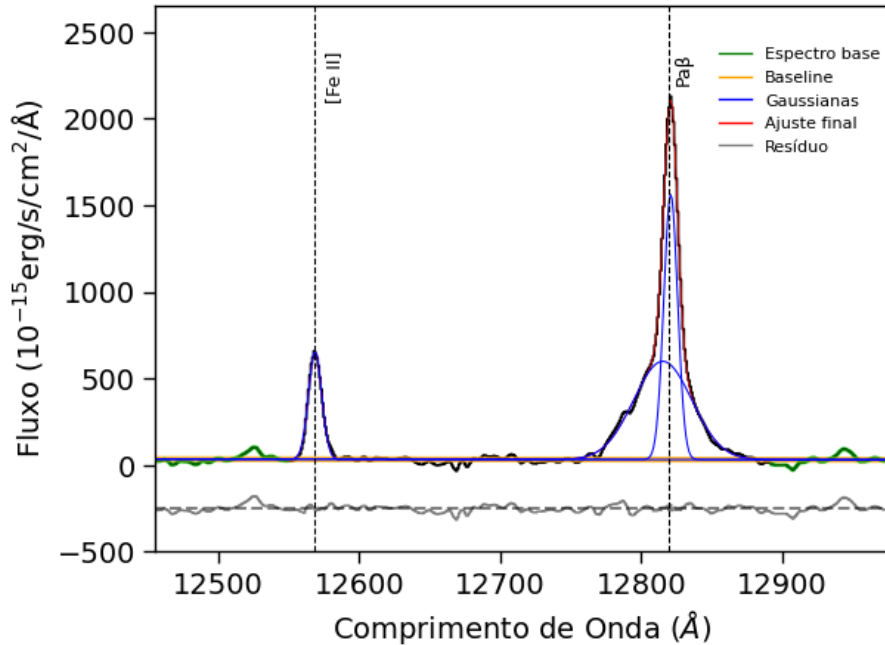


Figura 2.13: Ajuste espectral da região das linhas $[\text{Fe II}] 1.257\mu\text{m}$ e $\text{Pa}\beta 1.282\mu\text{m}$ na galáxia NGC 4395. As cores e linhas tracejadas estão apresentadas conforme a Fig. 2.12. Fonte: Autora.

Esse tipo de abordagem foi adotado em diversos ajustes realizados neste trabalho, com o objetivo de refletir vínculos físicos plausíveis entre pares de linhas. Por exemplo, foi imposta a igualdade entre as larguras das linhas $[\text{S III}] 9.53\mu\text{m}$ e $[\text{Fe II}] 1.257\mu\text{m}$, sob a suposição de que ambas se originam em regiões com propriedades cinemáticas semelhantes. De forma análoga, quando detectadas simultaneamente, as linhas $[\text{Fe II}] 1.257\mu\text{m}$ e $[\text{Fe II}] 1.643\mu\text{m}$ foram ajustadas com FWHMs idênticos, considerando que correspondem a transições metaestáveis do mesmo íon (Fe^+) e, portanto, compartilham uma origem

física comum. Além disso, foi imposta uma razão de intensidade fixa, aproximadamente igual a 0,75, entre essas duas linhas, conforme previsto por modelos atômicos para condições típicas de baixa densidade no meio interestelar (Rodríguez-Ardila *et al.*, 2004). A aplicação desses vínculos contribui para a maior robustez dos ajustes e permite associar as diferentes componentes de linhas do mesmo íon ou molécula a distintas regiões do gás emissor. Ainda, é especialmente adequada para garantir um bom ajuste em espectros com baixa relação sinal-ruído.

2.4.4 Estimativa de limite superior e erro do fluxo

Após o ajuste, o `pyspeckit` retorna diversos parâmetros físicos relevantes, como amplitude, centroide, largura (σ), fluxo integrado (calculado como $A \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}$ para uma gaussiana), FWHM, largura equivalente (EQW, do inglês *equivalent width*) e os resíduos do ajuste.

Em alguns casos, quando uma linha de emissão não pode ser medida com confiança devido a baixos níveis de sinal, interferências ou contaminação por outras componentes, torna-se necessário estimar um limite superior para seu fluxo. Essa estimativa representa o valor máximo plausível que a linha pode apresentar, considerando o ruído local do espectro e as propriedades cinemáticas de uma linha de referência bem detectada. No contexto da espectroscopia de AGNs, o cálculo de limites superiores é especialmente relevante para linhas situadas em regiões do espectro com baixa relação sinal-ruído ou *blended* (mescladas) com outras linhas, problema comum em fontes do tipo 1. Riffel *et al.* (2006a) destacam que, em tais casos, a sobreposição de linhas e os efeitos físicos do ambiente nuclear dificultam a medição precisa dos fluxos, tornando necessário o uso de estimativas indiretas ou limites superiores. Uma alternativa eficiente é utilizar pares de linhas de emissão proibida, como as linhas [Fe II] em $1.257\mu\text{m}$ e $1.643\mu\text{m}$, que compartilham a mesma origem física e são menos sensíveis a variações de temperatura e densidade, permitindo estimativas mais confiáveis de parâmetros físicos (Rodríguez-Ardila *et al.*, 2004).

Neste trabalho, para linhas pouco confiáveis, como $\text{Br}\gamma$, Fe II $1.257\mu\text{m}$ e outras, adotamos a largura (FWHM) estimada de uma linha próxima e bem detectada, como H_2 ou $\text{Pa}\beta$, para fixar a largura esperada da linha fraca. Em seguida, o limite superior do fluxo é calculado multiplicando-se o ruído local do contínuo, medido pelo RMS (do inglês, *root mean square*), pela largura da linha e por um fator sigma que determina o nível de confiança. A expressão utilizada para esse cálculo é:

$$F_{\text{limite}} = 1.064 \times N_{\sigma} \times \text{RMS}_{\text{contnuo}} \times \text{FWHM}, \quad (2.4)$$

onde o fator $1.064 = \sqrt{\pi/(4 \ln 2)}$ corrige a diferença entre a área de uma gaussiana e a estimativa simples altura \times FWHM. O parâmetro N_{σ} é o fator sigma escolhido para o limite de confiança (neste trabalho, 3σ), $\text{RMS}_{\text{contnuo}}$ é o desvio padrão do ruído do

contínuo local, e FWHM é a largura total da linha em angstroms, estimada a partir de uma linha de referência. Essa formulação segue uma prática comum em análise espectral, onde o fator 3σ é adotado para garantir um nível de confiança estatístico elevado — aproximadamente 99,7% para uma distribuição normal. Esse critério implica que qualquer sinal com fluxo inferior a esse limite pode ser atribuído ao ruído local do espectro, evitando falsas detecções. Assim, o valor calculado representa um limite superior conservador, mas realista, sendo amplamente utilizado na literatura para assegurar consistência e robustez nas análises espectroscópicas [Gehrels \(1986\)](#).

A estimativa do erro associado ao fluxo integrado das linhas de emissão foi realizada com base na formulação proposta por [Gonzalez-Delgado *et al.* \(1994\)](#), que leva em conta o ruído do contínuo local e a largura da linha ajustada. A incerteza foi calculada segundo:

$$\sigma_F = \text{RMS}_{\text{cont}} \cdot \sqrt{N + \left| \frac{\text{EQW}}{\delta\lambda} \right|}, \quad (2.5)$$

onde RMS_{cont} é o desvio padrão do contínuo local, N é o número de pixels sob a linha de emissão, EQW é a largura equivalente, e $\delta\lambda$ é a dispersão espectral em Å/pixel. Essa abordagem permite uma estimativa realista do erro, especialmente eficaz para linhas com baixo sinal ou perfis não triviais, e foi amplamente utilizada na literatura de análise espectral de galáxias.

A análise sistemática dos resíduos e o controle dos vínculos impostos foram fundamentais para assegurar que os perfis ajustados refletissem com precisão a complexidade cinemática e morfológica das linhas. Em particular, a coerência entre múltiplas transições de um mesmo íon forneceu uma importante verificação cruzada da robustez dos ajustes espectrais. Os fluxos resultantes dessas análises cuidadosas servem como entrada principal para as investigações subsequentes das propriedades do gás, especialmente através dos diagramas de diagnósticos de razões de linha, que serão apresentados no capítulo a seguir.

Capítulo 3

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo do trabalho, organizados em três seções principais. A Seção 3.1 descreve os espectros no NIR, já com a contribuição estelar removida, destacando as principais linhas de emissão identificadas nas galáxias da amostra. Na Seção 3.2, são explorados os diagramas de diagnóstico aplicados para investigar os mecanismos de excitação do gás, com comparação a amostras da literatura. Por fim, a Seção 3.3 discute os valores de avermelhamento e extinção obtidos para os objetos analisados.

3.1 Espectros NIR e Principais Linhas de Emissão

O espectro no infravermelho próximo é particularmente rico em linhas de emissão, muitas das quais são cruciais para o diagnóstico das condições físicas e dos mecanismos de excitação do gás em galáxias. Neste trabalho, realizamos uma análise sistemática das seguintes linhas, localizadas nas bandas $z + J$ (0.9 - 1.3 μm), H (1.45 - 1.8 μm) e K (2.0 - 2.4 μm): [S III] 0.953 μm , [C I] 0.985 μm , Pa δ 1.005 μm , Pa γ 1.094 μm , He I 1.083 μm , [P II] 1.188 μm , [Fe II] 1.257 μm e 1.643 μm , Pa β 1.282 μm , H₂ 2.121 μm e Br γ 2.166 μm .

Essas transições foram escolhidas por aparecerem com frequência nos espectros, apresentarem perfis bem isolados (minimizando problemas de *blending*) e possuírem boa relação sinal-ruído, o que permite ajustes confiáveis. Além disso, são traçadores fundamentais para identificar fontes ionizantes, presença de choques e distinguir entre excitação térmica e não térmica do gás (e.g., [Oliva et al. 1989](#); [Rodríguez-Ardila et al. 2004](#), [Rodríguez-Ardila et al. 2005](#), [Riffel et al. 2006a](#), [Riffel et al. 2013a](#), [Calabrò et al. 2023](#)).

Essas linhas constituem uma base sólida para investigar as condições físicas do gás da amostra, permitindo a construção de diagramas de classificação, estimativas de extinção e a interpretação dos mecanismos dominantes em cada galáxia. A Figura 3.1 mostra os espectros NIR de seis galáxias, organizados nas bandas $Z + J$, H e K .

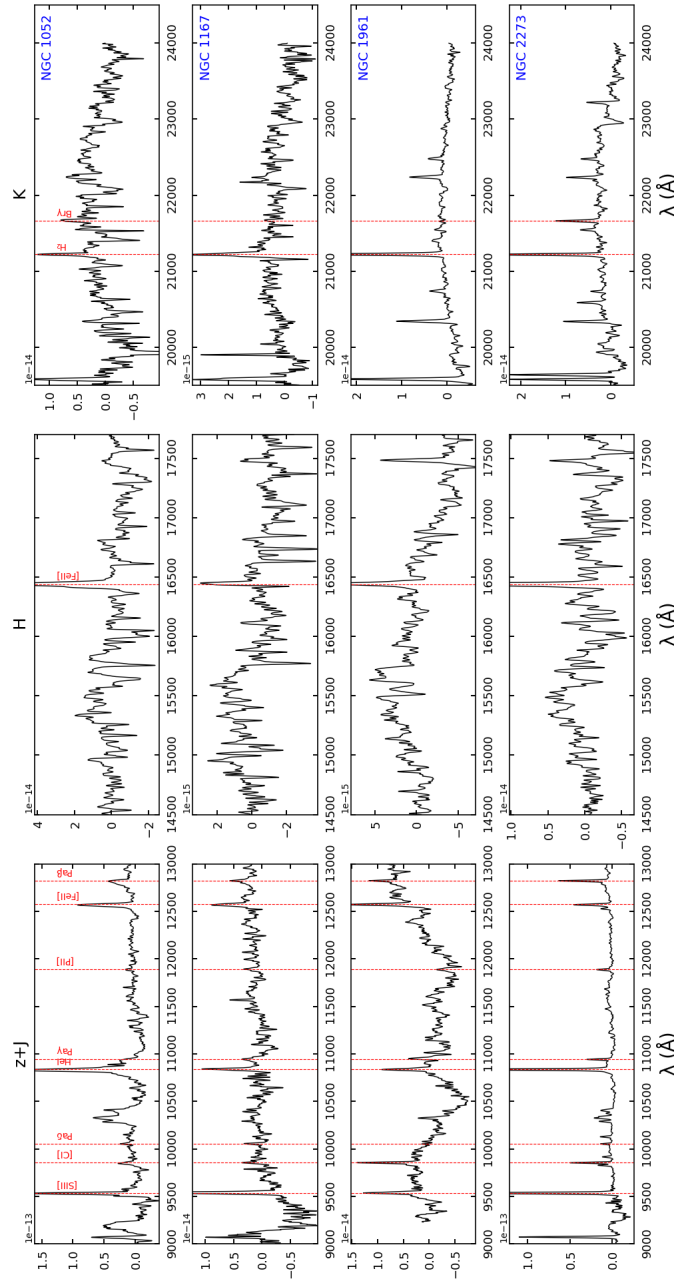


Figura 3.1: Espectros no infravermelho próximo de seis galáxias da amostra (NGC 1052, NGC 1167, NGC 1961 e NGC 2273), organizados pelas bandas $Z + J$, H e K . as principais transições espectrais discutidas acima estão destacadas em vermelho. O eixo y está em unidades de $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$. Fonte: Autora.

Uma inspeção visual da Figura 3.1 revela que grande parte das galáxias apresenta linhas intensas de $[\text{Fe II}]$ e H_2 , indicando a presença de gás molecular quente e ferro ionizado. As linhas de recombinação do hidrogênio ($\text{Pa}\beta$, $\text{Br}\gamma$) também estão presentes, com intensidades variadas que sugerem diferenças nos mecanismos de excitação. Por exemplo, NGC 2273 exibe um espectro típico de Seyfert, com linhas de recombinação mais intensas, enquanto NGC 1052 e NGC 1167 mostram perfis dominados por $[\text{Fe II}]$ e H_2 , típicos de LINERs. Os espectros completos das demais galáxias estão disponíveis no Apêndice A.

3.1.1 Fluxo das linhas de emissão

Os fluxos das linhas de emissão identificadas e ajustadas (conforme detalhado no Capítulo 2, § 2.4) estão apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2. A Tabela 3.1 exibe os fluxos das linhas para a maior parte da amostra. Já a Tabela 3.2 apresenta os resultados para as galáxias que exibem componentes largas nas linhas de emissão, as quais estão assinaladas com um asterisco (*). Linhas que coincidem com regiões afetadas por bandas de absorção da atmosfera terrestre (bandas telúricas) são indicadas por BT, representando casos nos quais não foi possível realizar uma medição confiável.

Tabela 3.1: Fluxos de emissão das linhas espectrais para a amostra de galáxias deste trabalho, expressos em unidades de $10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. As duas primeiras colunas indicam a identificação da linha e seu comprimento de onda laboratorial. As demais colunas apresentam os fluxos medidos para cada galáxia. Valores sem erro referem-se a limites superiores (3σ , como visto em §2.4.4). Entradas indicadas com **BT** correspondem a regiões afetadas por bandas telúricas.

Linha	λ_{lab} (Å)	NGC 2655	NGC 315	NGC 404	NGC 1052	NGC 1167	NGC 1961	NGC 2273	NGC 2639
[SIII]	9530	15.8 ± 0.90	7.58 ± 0.66	4.28 ± 0.72	43.8 ± 0.53	6.44 ± 0.44	2.15 ± 0.39	41.3 ± 0.35	4.20 ± 0.77
[C I]	9850	6.46 ± 0.70	0.78 ± 0.29	—	1.76 ± 0.97	—	1.88 ± 0.39	7.04 ± 0.65	4.41 ± 2.50
Pa δ	10049	2.08 ± 0.60	—	—	—	—	—	1.58 ± 0.21	—
Pa γ	10938	—	—	—	—	—	1.08 ± 0.39	3.86 ± 0.38	—
[P II]	11882	—	—	—	—	0.17 ± 0.02	0.15 ± 0.07	2.58 ± 0.35	1.50 ± 0.63
Pa β	12818	10.4 ± 2.34	0.72 ± 0.42	1.71 ± 0.39	11.7 ± 3.20	0.66 ± 0.25	0.73 ± 0.26	8.62 ± 0.33	—
[Fe II]	12570	12.0 ± 0.89	0.94 ± 0.27	7.43 ± 0.55	28.6 ± 2.36	2.04 ± 0.45	2.83 ± 0.30	8.06 ± 0.39	10.9 ± 0.89
[Fe II]	16430	12.3 ± 1.67	—	8.45 ± 1.73	24.8 ± 3.82	0.89 ± 0.30	3.36 ± 0.50	9.64 ± 0.73	9.05 ± 1.09
Pa α	18750	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
H ₂	21218	6.31 ± 0.56	1.04 ± 0.34	0.94 ± 0.18	3.14 ± 0.75	1.22 ± 0.13	9.31 ± 0.20	6.86 ± 0.21	2.18 ± 0.23
Br γ	21655	1.14	0.73	0.36	1.43	0.27	0.40	2.34 ± 0.81	—

		NGC 4450	NGC 4548	NGC 4579	NGC 4750	NGC 5005	NGC 5033	NGC 5194	NGC 5273
[SIII]	9530	10.4 ± 1.11	—	19.8 ± 1.55	3.74 ± 0.66	13.1 ± 2.82	11.1 ± 1.16	22.9 ± 0.84	9.45 ± 1.49
[C I]	9850	—	1.07 ± 0.26	6.37 ± 1.16	2.35 ± 0.66	17.0 ± 1.71	4.44 ± 1.54	2.89 ± 0.61	—
Pa δ	10049	—	1.22 ± 0.27	—	—	—	—	—	2.50 ± 0.64
Pa γ	10938	—	1.59 ± 0.59	—	—	—	—	—	2.41 ± 0.78
[P II]	11882	—	—	—	—	—	—	1.74 ± 0.27	—
Pa β	12818	—	1.29 ± 0.71	3.56 ± 1.11	0.94 ± 0.28	10.0 ± 3.23	—	2.83 ± 0.45	1.82 ± 0.42
[Fe II]	12570	4.83 ± 0.85	1.51 ± 0.67	15.0 ± 1.76	2.60 ± 0.64	32.1 ± 2.47	9.88 ± 1.16	6.83 ± 0.40	2.90 ± 0.41
[Fe II]	16430	3.36 ± 0.27	—	10.4 ± 1.33	2.35 ± 0.49	29.3 ± 5.21	7.89 ± 0.98	5.72 ± 0.79	2.54 ± 0.76
Pa α	18750	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
H ₂	21218	1.44 ± 0.32	1.59 ± 0.23	4.74 ± 0.60	5.75 ± 0.20	36.1 ± 1.66	3.99 ± 0.67	3.01 ± 0.27	—
Br γ	21655	—	1.01 ± 0.29	0.67	0.33	3.46	—	1.33 ± 0.24	—

		NGC 7743	NGC 3079	NGC 3190	NGC 3718	NGC 3998	NGC 4388	NGC 3147	NGC 6500
[SIII]	9530	26.3 ± 2.60	—	—	2.91 ± 0.47	84.8 ± 4.70	94.5 ± 0.23	11.4 ± 1.34	29.4 ± 2.10
[C I]	9850	5.88 ± 1.58	—	3.29 ± 0.57	—	—	1.40 ± 0.14	4.17 ± 1.13	8.05 ± 0.61
Pa δ	10049	4.14 ± 0.47	—	1.00 ± 0.51	—	11.7 ± 1.75	4.81 ± 0.20	2.76 ± 0.75	3.40 ± 1.23
Pa γ	10938	—	—	—	—	—	8.27 ± 0.29	3.25 ± 0.38	9.35 ± 1.36
[P II]	11882	—	—	—	—	—	2.90 ± 0.37	2.01 ± 0.30	—
Pa β	12818	8.94 ± 1.75	0.73 ± 0.37	2.18 ± 0.48	—	53.2 ± 4.52	18.4 ± 0.28	2.49 ± 0.83	8.56 ± 1.53
[Fe II]	12570	16.5 ± 2.13	4.10 ± 0.55	1.93 ± 0.16	1.69 ± 0.12	35.4 ± 1.35	7.25 ± 0.30	6.05 ± 0.99	24.2 ± 1.81
[Fe II]	16430	—	6.12 ± 0.47	—	—	30.0 ± 4.43	9.17 ± 0.63	4.14 ± 0.98	22.5 ± 4.73
Pa α	18750	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
H ₂	21218	—	10.9 ± 0.49	1.84 ± 0.19	0.26 ± 0.01	—	5.59 ± 0.22	1.34 ± 0.27	9.94 ± 0.92
Br γ	21655	—	0.92 ± 0.25	0.75	—	—	6.79 ± 0.28	1.29 ± 0.38	4.68 ± 1.11

Tabela 3.2: Fluxos de emissão (em unidades de 10^{-15} ergs $^{-1}$ cm $^{-2}$) das linhas espectrais para a amostra de galáxias deste trabalho, nas quais medimos componentes largas (indicadas por asteriscos). Assim como na Tabela 3.1, os valores sem erro referem-se a limites superior. Entradas indicadas com **BT** correspondem a regiões afetadas por bandas telúricas.

Ion	λ_{lab} (Å)	NGC 7217	NGC 3031	NGC 7469	NGC 4395	NGC 4235	NGC 4258
[S III]	9530	1.11 ± 0.44	29.0 ± 2.60	54.3 ± 0.48	87.2 ± 0.78	7.54 ± 0.57	18.4 ± 3.52
[S III]*	9530	—	103.0 ± 9.23	42.8 ± 0.95	6.44 ± 0.26	6.89 ± 0.91	97.4 ± 5.65
[C I]	9850	2.37 ± 0.43	13.9 ± 3.92	4.54 ± 1.15	1.22 ± 0.39	0.54 ± 0.14	—
Pa δ	10049	—	9.50 ± 3.38	4.56 ± 2.66	3.73 ± 0.89	0.37 ± 0.11	3.16 ± 1.09
Pa δ *	10049	—	—	60.7 ± 18.1	8.71 ± 1.48	—	—
Pa γ	10938	—	—	12.5 ± 2.07	6.42 ± 0.44	—	2.40 ± 0.72
[P II]	11882	—	7.09 ± 2.36	4.07 ± 0.50	1.13 ± 0.22	—	—
Pa β	12818	1.18 ± 0.35	8.13 ± 1.75	16.0 ± 0.80	19.0 ± 0.69	0.62 ± 0.12	2.94 ± 0.88
Pa β *	12818	—	89.4 ± 19.25	90.5 ± 1.66	29.7 ± 1.18	—	29.4 ± 5.69
[Fe II]	12570	3.85 ± 0.50	18.3 ± 2.13	7.79 ± 1.41	7.16 ± 0.40	0.81 ± 0.19	4.56 ± 1.09
[Fe II]*	12570	—	19.5 ± 2.13	—	—	—	7.43 ± 2.11
[Fe II]	16430	2.24 ± 0.91	18.8 ± 2.60	5.74 ± 1.00	7.39 ± 0.68	0.99 ± 0.11	6.02 ± 0.24
Pa α	18750	BT	BT	BT	BT	BT	BT
H $_2$	21218	2.88 ± 0.22	3.47 ± 1.06	5.23 ± 0.50	2.22 ± 0.11	—	—
Br γ	21655	0.65	10.1 ± 3.48	3.49 ± 0.58	3.12 ± 0.52	—	—
Br γ *	21655	—	—	13.9 ± 3.67	—	—	—

3.1.2 Galáxias sem Linhas em Emissão Detectáveis na Amostra

Embora a maior parte da amostra apresente linhas de emissão detectáveis no infravermelho próximo, 16 galáxias não exibiram razões sinal-ruído suficientes para permitir a identificação e mensuração confiável das linhas de interesse, como [S III], Pa β e Br γ . Nesses casos, o nível de ruído presente nos espectros é comparável ou superior ao sinal esperado das linhas, o que impossibilita a separação clara entre emissão astrofísica e ruído instrumental. Como ilustrado na Figura 3.2, as estruturas espectrais que deveriam corresponder às linhas são ofuscadas pelo ruído, comprometendo qualquer tentativa de ajuste de perfil ou medição de fluxo.

Para três galáxias — NGC 410, NGC 474 e NGC 2832, não foi possível medir o fluxo de nenhuma linha de emissão. Outras 13 galáxias (NGC 205, NGC 266, NGC 1358, NGC 2768, NGC 3169, NGC 3607, NGC 4203, NGC 4565, NGC 4594, NGC 4725, NGC 5371, NGC 5850 e NGC 7331) apresentaram espectros com alto nível de ruído, nos quais apenas uma, duas ou no máximo três linhas puderam ser identificadas com baixa confiabilidade (é possível notar isso nos espectros dessas galáxias apresentados no Apêndice A). Nessas condições, a escassez e a baixa qualidade dos dados inviabilizaram o uso desses objetos na construção dos diagramas de diagnóstico.

Apesar disso, a maior parte das galáxias da amostra apresenta espectros com qualidade suficiente para a medição dos fluxos de emissão. Com base nesses fluxos, é possível calcular as razões entre linhas específicas e, assim, construir os diagramas de diagnóstico no NIR.

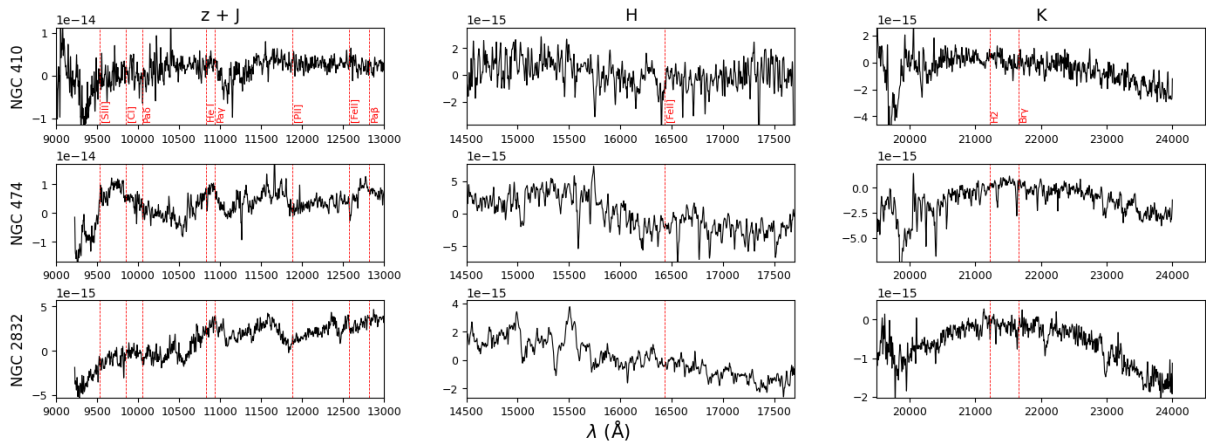


Figura 3.2: Exemplos de espectros NIR de três galáxias da amostra (NGC 410, NGC 474 e NGC 2832) onde não foi possível detectar linhas de emissão com S/N suficiente. As regiões esperadas para as principais linhas estão dominadas por ruído, o que impede a medição precisa dos fluxos. As bandas $z + J$, H e K estão dispostas da esquerda para a direita, respectivamente. O eixo y está em unidades de $\text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Å}^{-1}$.

Esses diagramas serão utilizados na próxima seção para investigar as propriedades físicas e os mecanismos de excitação do gás nessas galáxias.

3.2 Diagramas de Diagnóstico

3.2.1 Classificação dos mecanismos de excitação

Para investigar os mecanismos dominantes de excitação do gás nas galáxias da amostra, utilizamos o diagrama de diagnóstico originalmente proposto por [Larkin *et al.* \(1998b\)](#) e posteriormente empregado por [Rodríguez-Ardila *et al.* \(2004\)](#). Este diagrama (a partir de agora indicaremos como **Fe2H2**) é baseado nas razões de intensidade das linhas $[\text{Fe II}] 1.257 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$ e $\text{H}_2 2.121 \mu\text{m}/\text{Br}\gamma$, que são amplamente empregadas para diferenciar as fontes de excitação no infravermelho próximo, como os AGNs e as regiões de formação estelar (*starbursts*).

As razões $[\text{Fe II}]/\text{Pa}\beta$ e $\text{H}_2/\text{Br}\gamma$ são particularmente úteis por refletirem diretamente as condições físicas do meio gasoso. Como discutido na Seção 3.1, a linha $[\text{Fe II}]$ é sensível a regiões parcialmente ionizadas e processos de choque, enquanto a emissão do H_2 pode ser excitada tanto por radiação UV quanto por aquecimento devido a choques ou a raios-X. As linhas de recombinação do hidrogênio, $\text{Pa}\beta$ e $\text{Br}\gamma$, servem como referência para normalizar a intensidade das linhas de Fe II e H_2 . Uma vantagem crucial dessas razões no NIR é sua baixa sensibilidade à extinção interestelar, pois os pares de linhas estão em comprimentos de onda próximos, resultando em um efeito diferencial de avermelhamento desprezível ([Rodríguez-Ardila *et al.*, 2004](#)). Essa característica garante maior robustez na classificação dos mecanismos de excitação, mesmo em ambientes com poeira significativa.

O diagrama Fe2H2 estabelece a seguinte classificação para os mecanismos de excitação, baseada nas razões de intensidade das linhas $H_2/Br\gamma$ (eixo x) e $[Fe II]/Pa\beta$ (eixo y):

- **Starbursts:** galáxias com razões em ambas as linhas tipicamente menores que ~ 0.6 , indicando predominância da fotoionização por estrelas jovens e quentes.
- **AGNs de Baixa Ionização (LINERs):** Apresentam valores elevados para ambas as razões (geralmente maiores que ~ 0.6), refletindo a dominância de choques e/ou fotoionização por radiação dura.
- **AGNs Clássicos (Seyferts):** Embora não haja um critério de corte único para Seyferts, eles geralmente se situam em regiões intermediárias ou com razões mais elevadas, dependendo da contribuição específica de cada mecanismo.

O estudo de [Rodríguez-Ardila *et al.* \(2004\)](#) também observa que, para baixos valores das razões (ambas menores que aproximadamente 2), há uma possível correlação positiva entre $[Fe II]/Pa\beta$ e $H_2/Br\gamma$, sugerindo mecanismos de excitação semelhantes. Contudo, para valores acima de 2, essa correlação se desfaz, indicando que diferentes processos (e.g., choques por jatos de rádio, radiação-X, formação estelar circumnuclear) podem dominar a produção dessas linhas, auxiliando na distinção entre diferentes tipos de atividades nucleares.

A Figura 3.3 apresenta a distribuição das galáxias da nossa amostra (círculos vermelhos) neste diagrama, em comparação com objetos da amostra de [Riffel *et al.* \(2006b\)](#) (quadrados azuis) — a qual é composta por uma variedade de AGNs clássicos, incluindo galáxias Seyfert do tipo 1 e 2, permitindo a contextualização dos nossos resultados em relação a outras classes de AGNs. O diagrama Fe2H2 revela que, entre as galáxias da nossa amostra para as quais foi possível medir todas as linhas necessárias para esse diagnóstico, mais da metade (aproximadamente 53%) se classifica como LINERs, exibindo valores elevados para as razões $[Fe II]/Pa\beta$ e $H_2/Br\gamma$. As galáxias identificadas como LINERs com base nesse diagrama são: NGC 1961, NGC 4750, NGC 3079, NGC 5005, NGC 4579, NGC 7217, NGC 1167, NGC 404, NGC 6500, NGC 1052 e NGC 5194. Esse resultado está em conformidade com a definição clássica de LINERs como objetos com espectros dominados por linhas de baixa ionização ([Heckman, 1980](#)), indicando a predominância de excitação por choques e/ou fotoionização por radiação dura de um núcleo ativo.

Um aspecto particularmente interessante deste estudo é a reclassificação de algumas galáxias com base na análise do diagrama de diagnóstico. Na literatura, quatro das galáxias analisadas – NGC 4579 (ID 9), NGC 1167 (ID 10), NGC 3079 (ID 14) e NGC 5194 (ID 17) – são tradicionalmente classificadas como Seyfert (tipo 1 ou 2) em estudos anteriores. No entanto, como visto na Figura 3.3, essas galáxias foram posicionadas na região correspondente aos LINERs. Esse resultado sugere que, embora apresentem características típicas de Seyfert em outros domínios espectrais ou por diferentes métodos de

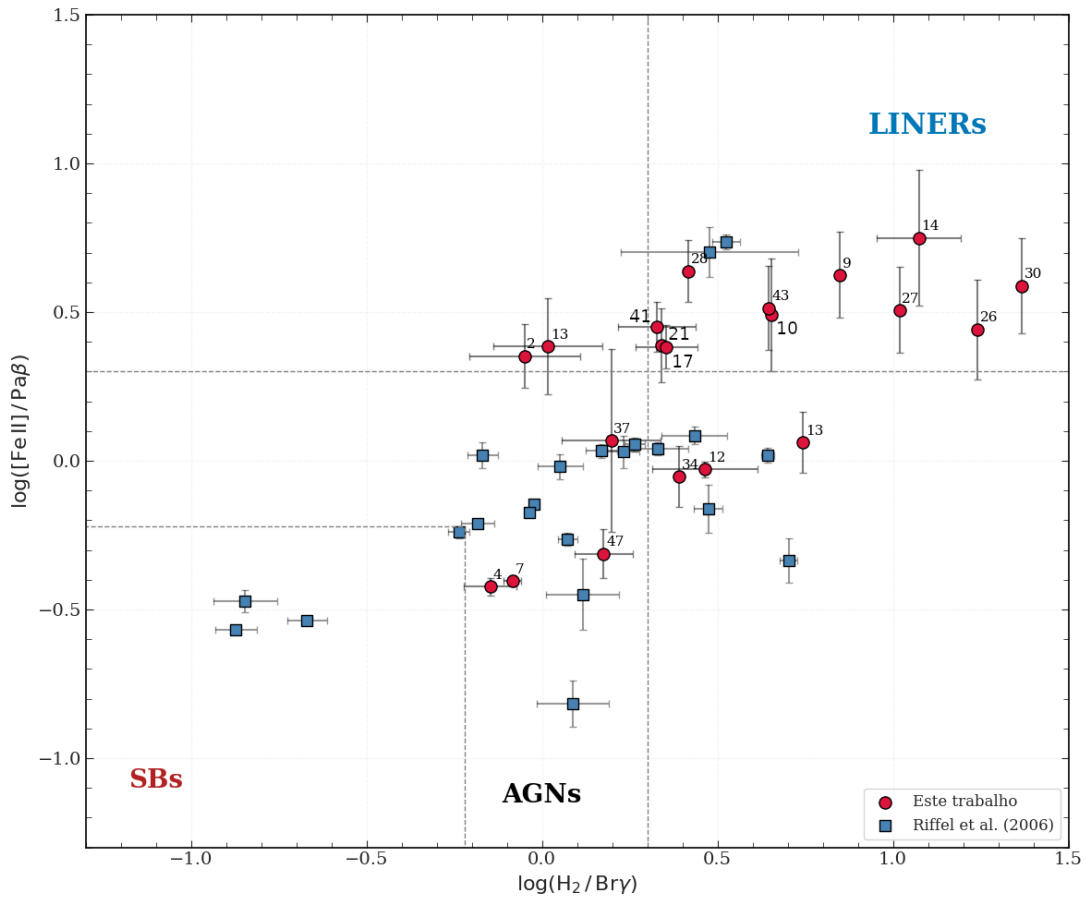


Figura 3.3: Diagrama diagnóstico Fe2H2 (proposto por [Rodríguez-Ardila et al. 2004](#)) para as galáxias da amostra. O eixo x representa a razão $H_2/Br\gamma$ e o eixo y a razão $[Fe II]/Pa\beta$. As regiões características de AGNs, starbursts e choques estão indicadas. Pontos vermelhos correspondem às galáxias desta amostra e pontos azuis a dados da literatura ([Riffel et al. 2006b](#)). Os números indicados no gráfico correspondem aos IDs das galáxias definidos na Tabela 2.1. Fonte: Autora.

classificação, suas razões de linhas no infravermelho próximo indicam uma natureza mais compatível com LINERs.

De modo geral, os resultados obtidos com o diagrama Fe2H2 indicam uma dominância de objetos com características compatíveis com LINERs na amostra de [Mason et al. \(2015\)](#). Nenhuma das galáxias analisadas apresenta emissão compatível com uma galáxia do tipo *starburst*, o que reforça o cenário de excitação associada a núcleos ativos. Esse panorama destaca a eficácia dos diagnósticos espectrais no NIR como ferramentas sensíveis para investigar os mecanismos de excitação em AGNs, complementando e, por vezes, refinando classificações baseadas em outros comprimentos de onda.

3.2.1.1 Versão Alternativa do Diagrama Fe2H2

Além do diagrama proposto por [Rodríguez-Ardila et al. \(2004\)](#), exploramos também uma versão alternativa baseada na proposta de [Colina et al. \(2015a\)](#). Essa versão compara

as razões $[\text{Fe II}]\lambda 1.644\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$ e $\text{H}_2\lambda 2.121\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$, utilizando apenas linhas das bandas H e K . A principal motivação para utilizar essa versão alternativa é sua aplicabilidade em casos onde a banda J apresenta baixa qualidade ou não está disponível, o que é comum em observações no infravermelho próximo. No entanto, esse diagrama possui limitações importantes — em particular, a linha $\text{Br}\gamma$ tende a ser fraca ou ausente em núcleos LINERs, o que pode dificultar sua aplicação a esse tipo de objeto.

A Figura 3.4 mostra o diagrama alternativo construído com os dados da nossa amostra. Observa-se que as galáxias anteriormente classificadas como AGN ou regiões de formação estelar (SF, do inglês *star formation*) no diagrama de Rodríguez-Ardila *et al.* (2004) mantêm sua classificação neste novo espaço de parâmetros, reforçando a robustez do diagnóstico espectral. Além disso, um subconjunto de LINERs que apresentaram $\text{Br}\gamma$ detectável também ocupou a mesma região do diagrama em ambas as versões, o que sugere consistência nos critérios de separação mesmo diante das limitações.

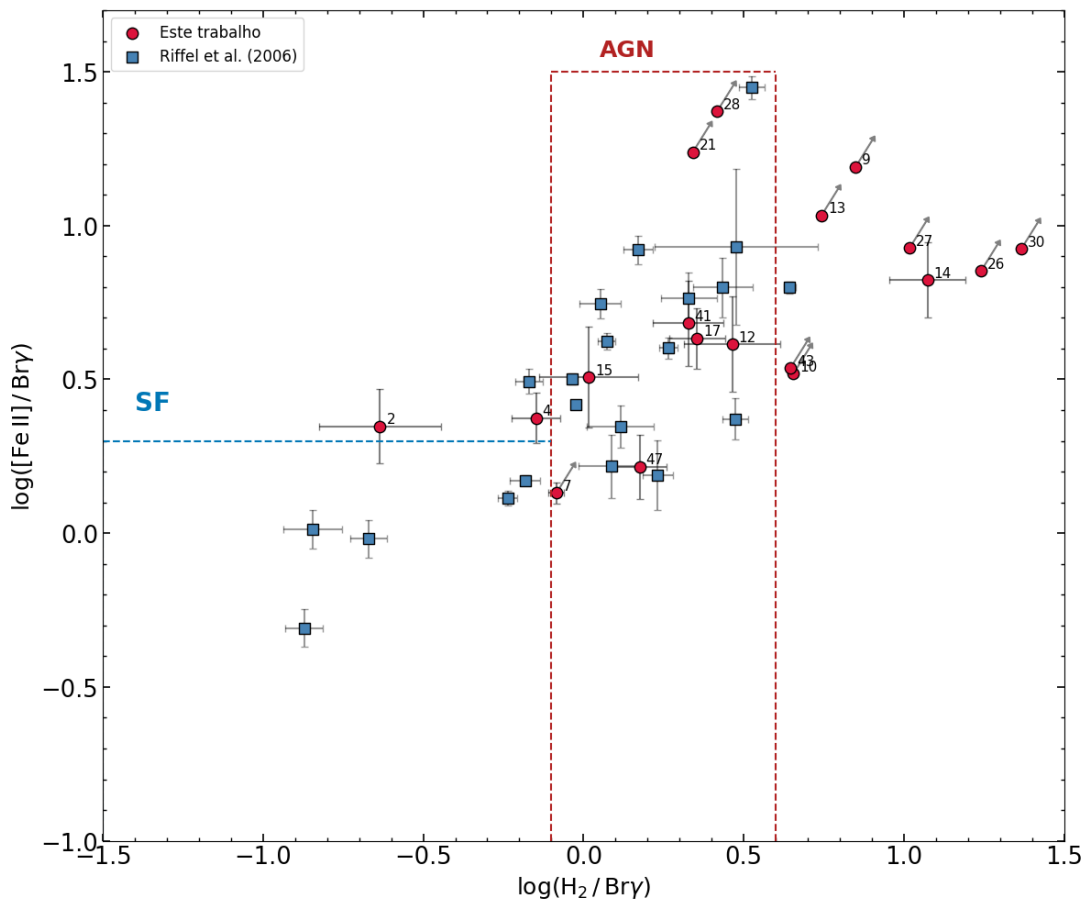


Figura 3.4: Diagrama diagnóstico alternativo, adaptado de Colina *et al.* (2015a), ilustrando as razões $[\text{Fe II}]\lambda 1.644\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$ e $\text{H}_2\lambda 2.121\mu\text{m}/\text{Br}\gamma$. Os círculos vermelhos representam os objetos desta amostra, enquanto os quadrados azuis indicam dados da literatura (Riffel *et al.*, 2006b). Os números ao lado dos círculos correspondem aos IDs das galáxias, conforme definidos na Tabela 2.1. As setas representam as galáxias com estimativas de limite superior.

3.2.2 Investigando a distribuição de LINERs em outros diagramas de diagnóstico no NIR

Dando continuidade à análise anterior, empregamos os diagramas de diagnóstico propostos por [Calabrò et al. \(2023\)](#). Este trabalho recente oferece uma abordagem estatística moderna para a classificação de galáxias baseada em dados observacionais de alta qualidade do JWST, utilizando o instrumento NIRSpec no projeto CEERS¹ (*Cosmic Evolution Early Release Science*).

Os autores desenvolveram critérios analíticos a partir de modelos de fotoionização gerados com o código `Cloudy`. Esses critérios baseiam-se em razões entre linhas de emissão brilhantes no infravermelho próximo, como [S III] 0.953 μm , [C I] 0.985 μm , [P II] 1.188 μm , [Fe II] 1.257 μm e 1.643 μm , normalizadas por linhas da série de Paschen (Pa γ ou Pa β). De forma análoga ao observado no diagrama Fe2H2, as razões de linhas propostas por [Calabrò et al. \(2023\)](#) também apresentam impacto mínimo da poeira interestelar. Isso ocorre porque cada par de linhas está muito próximo em comprimento de onda, o que reduz quase completamente o efeito diferencial de avermelhamento.

Seus resultados, aplicados a 64 fontes locais e 65 fontes em alto redshift (totalizando 129 objetos) no intervalo $0 \leq z \leq 3$, demonstraram a eficácia desses diagnósticos no NIR para separar AGNs de regiões de formação estelar, mesmo em galáxias distantes e obscurecidas. Eles reportaram um aumento de aproximadamente 60% na detecção de AGNs em comparação com critérios ópticos tradicionais (e.g., diagrama BPT), revelando uma população significativa de AGNs “escondidos” detectáveis apenas em comprimentos de onda mais longos.

No contexto deste trabalho, reproduzimos os diagramas de [Calabrò et al. \(2023\)](#) com o objetivo de investigar a distribuição das fontes da nossa amostra, buscando padrões de localização característicos nestes novos espaços de diagnóstico. Para isso, selecionamos combinações específicas de razões de linha, incluindo [Fe II]/Pa β , [S III]/Pa γ , [P II]/Pa β e [C I]/Pa β . Nos diagramas originais, os autores definem regiões esperadas para diferentes mecanismos de excitação por meio de duas curvas analíticas, baseadas em modelos de fotoionização do `Cloudy`. A linha contínua azul representa o limite superior de contribuição de regiões de formação estelar, enquanto a linha pontilhada vermelha demarca o limite máximo teórico de contribuição de AGNs. Essas divisões foram obtidas ajustando funções logarítmicas do tipo:

$$\log y = \frac{A}{\log x - \log x_0} + B, \quad (3.1)$$

onde os parâmetros A , x_0 e B variam conforme a combinação de linhas adotada, conforme detalhado na Tabela 3.3.

¹Para mais detalhes acessar <https://ceers.github.io/index.html>

Tabela 3.3: Coeficientes para as curvas teóricas dos diagramas de diagnósticos propostos por Calabrò *et al.* (2023), como definido pela Equação 3.1

Diagrama	y	x	A	$\log(x_0)$	B
Linhas Máximo SF					
Fe2S3- β	[S III] λ 9530 Å/Pa γ	[Fe II] λ 1.257 μ m/Pa β	0.87	0.47	1.80
P2S3	[S III] λ 9530 Å/Pa γ	[P II] λ 1.19 μ m/Pa β	0.17	-0.48	1.57
C1S3	[S III] λ 9530 Å/Pa γ	[C I] λ 9850 Å/Pa β	2.23	1.095	1.95
Linhas Máximo AGN					
Fe2S3- β	[S III] λ 9530 Å/Pa γ	[Fe II] λ 1.257 μ m/Pa β	0.56	0.41	1.13
P2S3	[S III] λ 9530 Å/Pa γ	[P II] λ 1.19 μ m/Pa β	0.285	-0.43	1.115
C1S3	[S III] λ 9530 Å/Pa γ	[C I] λ 9850 Å/Pa β	0.405	0.36	0.93

Notas. Se [S III]/Pa β for utilizada no eixo y em vez de [S III]/Pa γ , as linhas de separação obtidas com os coeficientes listados nesta tabela devem ser transladadas ao longo do eixo y em $-0,225$.

Para complementar a análise, incluímos nos diagramas dados de galáxias provenientes de trabalhos anteriores: Riffel *et al.* (2006b) (representadas por quadrados) e Cerqueira-Campos *et al.* (2021) (indicadas por losangos). Essa inclusão permite verificar se os padrões observados em nossa amostra se repetem em outros conjuntos de dados, fortalecendo a hipótese de que esses diagramas podem conter informações diagnósticas úteis também para a identificação e caracterização de LINERs. Adicionalmente, uma linha tracejada vermelha foi inserida em alguns dos diagramas (como CIS3 e Fe2S3- β). Embora não possua fundamentação teórica, essa linha foi construída com base na distribuição empírica das fontes previamente classificadas como LINERs (representadas por triângulos vermelhos). Seu intuito é destacar visualmente uma possível separação entre as LINERs e as demais AGNs da amostra, sugerindo uma tendência de localização dessas fontes em regiões específicas do espaço de parâmetros.

Os resultados da aplicação desses diagramas à nossa amostra são apresentados na Figuras 3.5, 3.6 e 3.7. É possível notar que, em alguns desses diagramas – especialmente nos casos CIS3 e Fe2S3- β – as LINERs tendem a se agrupar em regiões com intervalos de valores bem determinados. No diagrama Fe2S3- β , por exemplo, nove das galáxias identificadas como LINERs se concentram claramente na faixa delimitada por $0 < \log([\text{S III}]/\text{Pa}\beta) < 1$ e $0 < \log([\text{Fe II}]/\text{Pa}\beta) < 0.5$. Essas posições são coerentes com as ocupadas por LINERs nos demais diagramas analisados, o que valida a ideia de que essas fontes compartilham propriedades físicas similares no contexto do infravermelho próximo. Embora os diagramas não tenham sido originalmente concebidos para distinguir especificamente esse tipo de objeto, os padrões observados sugerem que tais ferramentas, quando combinadas com outros critérios ou outros diagnósticos, podem oferecer pistas relevantes sobre os mecanismos de excitação atuantes nos núcleos ativos de galáxia.

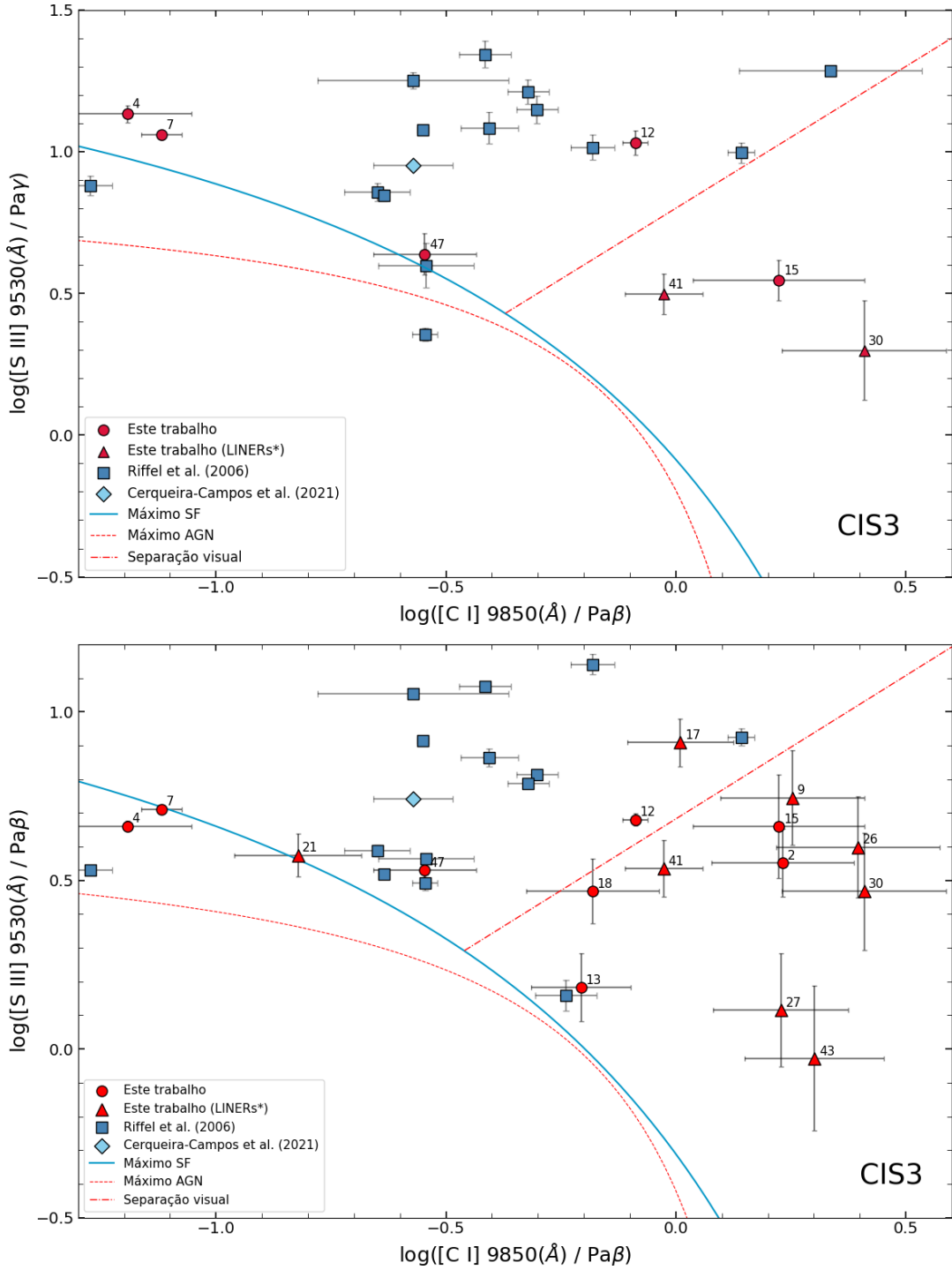


Figura 3.5: Diagramas de diagnósticos CIS3 propostos por [Calabrò et al. \(2023\)](#), aplicados às galáxias da amostra deste trabalho. **(Superior)** $[S\text{ III}]/Pa\gamma$ vs. $[C\text{ I}]/Pa\beta$; **(Inferior)** $[S\text{ III}]/Pa\beta$ vs. $[C\text{ I}]/Pa\beta$. A linha azul contínua representa o limite superior para emissão por formação estelar; a linha vermelha pontilhada define o limite máximo para AGNs; a linha vermelha tracejada indica a separação visual entre LINERs e outras AGNs. Os círculos vermelhos representam as galáxias da amostra deste trabalho, enquanto os triângulos vermelhos identificam as fontes classificadas como LINERs com base no diagrama Fe2H2 (marcadas como LINERs* na legenda dos gráficos). Os quadrados azuis correspondem às galáxias da amostra de [Riffel et al. \(2006b\)](#), e os losangos azul-claro às galáxias de [Cerqueira-Campos et al. \(2021\)](#). Os números próximos aos círculos referem-se aos IDs dos objetos, conforme definidos na Tabela 2.1. Fonte: Autora.

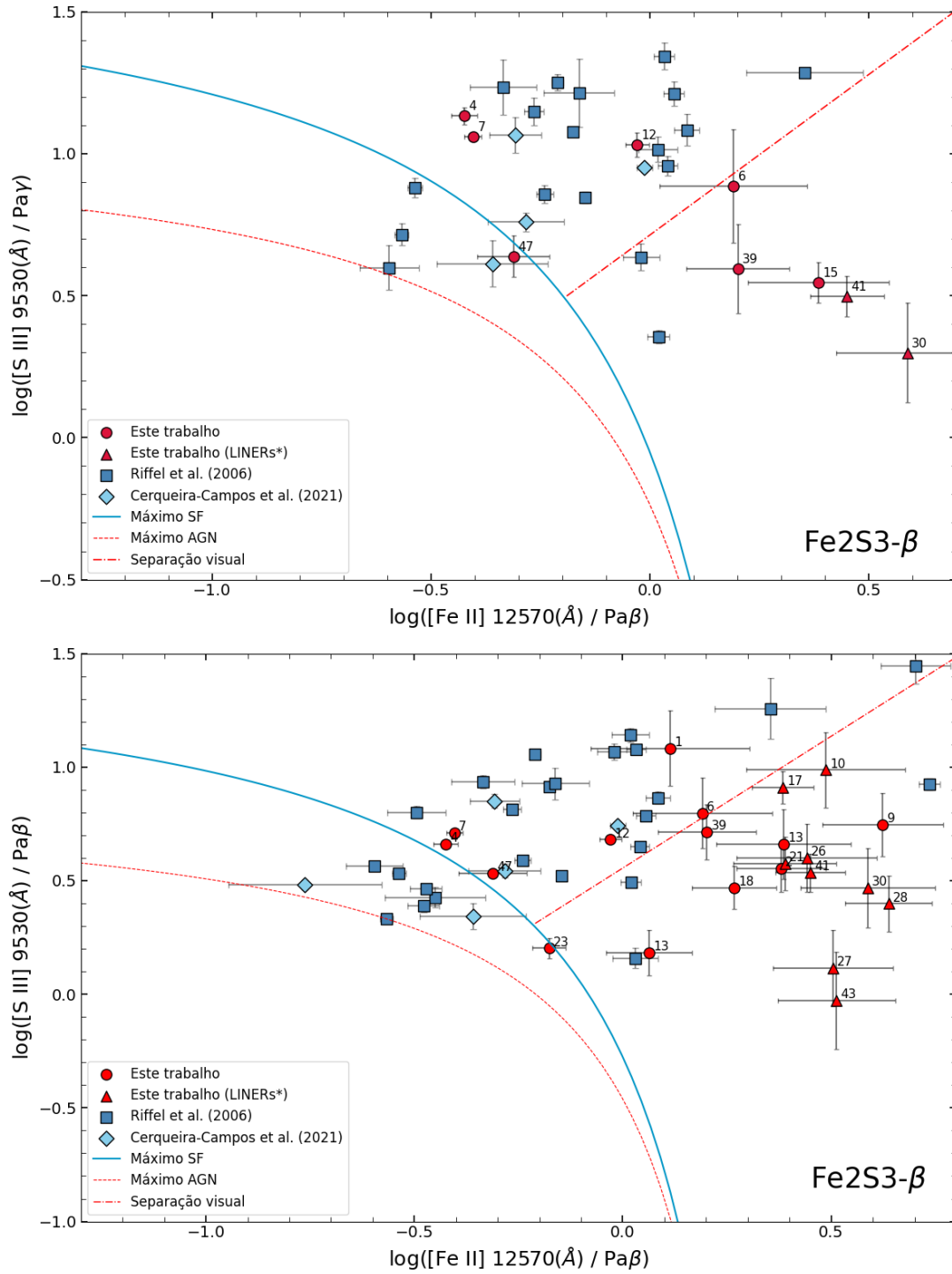


Figura 3.6: Diagramas de diagnósticos Fe2S3- β de Calabrò *et al.* (2023), aplicados à amostra deste trabalho. (**Superior**) [S III]/Pa γ vs. [Fe II]/Pa β ; (**Inferior**) [S III]/Pa β vs. [Fe II]/Pa β . A simbologia e as linhas de separação são as mesmas da Figura 3.5. Fonte: Autora.

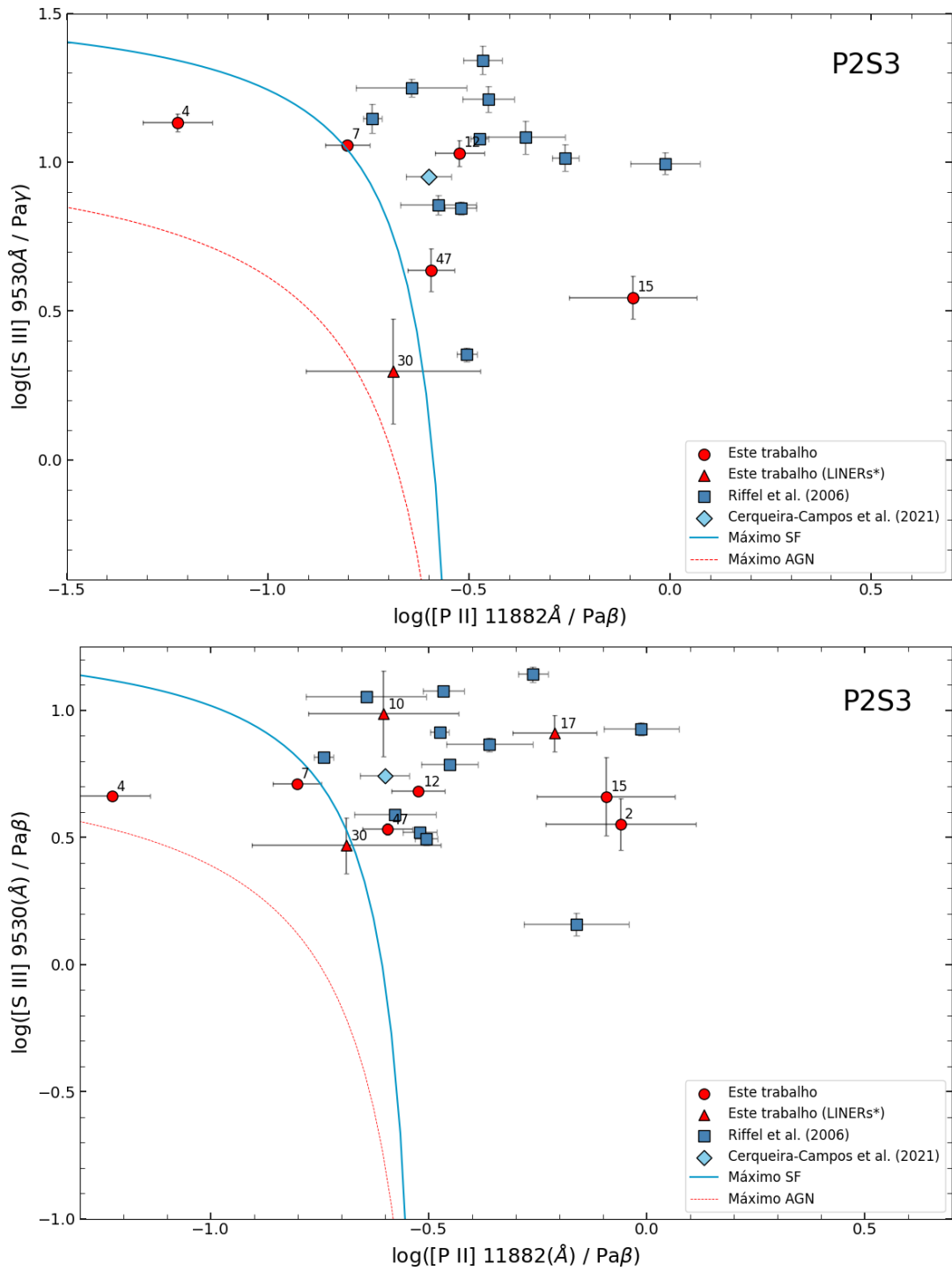


Figura 3.7: Diagramas de diagnósticos P2S3 baseados em [Calabrò et al. \(2023\)](#), para a amostra deste trabalho. (**Superior**) $[S III]/Pa\gamma$ vs. $[P II]/Pa\beta$; (**Inferior**) $[S III]/Pa\beta$ vs. $[P II]/Pa\beta$. A simbologia e as linhas de referência seguem as Figuras 3.5 e 3.6. Fonte: Autora.

Embora modelos de choque também consigam reproduzir parte das razões de linha observadas em AGNs, como mostrado por [Calabrò et al. \(2018, 2019\)](#), esses modelos preveem valores de $[Fe II]/Pa\beta$ até duas ordens de magnitude superiores aos observados,

o que sugere que choques não são o mecanismo dominante nas fontes analisadas. Essa superestimação decorre da destruição de grãos de poeira em choques rápidos, que libera ferro para a fase gasosa e intensifica artificialmente a emissão de [Fe II]. Simulações com o código MAPPINGS V (Sutherland *et al.*, 2018), como as reunidas na base 3MdB (Morisset *et al.*, 2015), indicam que a razão [Fe II]/[P II] pode atingir valores em torno de 20 nesse tipo de ambiente, enquanto se mantém próxima de 2 em regiões fotoionizadas. No caso das LINERs da nossa amostra, os valores observados para essa razão permanecem baixos, o que **reforça a interpretação de que a excitação do gás é dominada por fotoionização** – possivelmente associada à radiação não térmica emitida por um núcleo ativo fraco. Diante disso, o passo seguinte é investigar quais parâmetros físicos caracterizam o campo ionizante capaz de reproduzir as razões de linha observadas.

Com base nos modelos CLOUDY apresentados por Calabrò *et al.* (2023), grande parte dos objetos desta amostra se concentra, nos diagramas de diagnósticos NIR, em regiões associadas a parâmetros de ionização muito baixos, tipicamente $\log(U) \approx -4$ (ver Figura 8 de Calabrò *et al.* 2023). Esse valor, cerca de duas ordens de grandeza menor que o observado em AGNs luminosos ($\log(U) \approx -2$), indica campos ionizantes fracos, como esperado para núcleos de baixa luminosidade. Segundo os autores, tal regime é reproduzido por modelos de fotoionização com densidades moderadas ($n_H \sim 10^3\text{--}10^4 \text{ cm}^{-3}$) e espectros ionizantes mais “suaves”, com menor fração de fótons de alta energia. Nessas condições, a radiação não excita eficientemente espécies de alto potencial de ionização, favorecendo o predomínio de linhas de baixa ionização como [Fe II] e H₂, típicas de LINERs. Além disso, para $\log(U)$ baixos, os modelos preveem saturação na razão [S III]/Pa γ e leve decréscimo em [Fe II]/Pa β , em concordância com o observado nos diagramas Fe2S3- β (Figura 3.6). Assim, a localização das fontes da nossa amostra nestes diagramas é consistente com a emissão prevista para AGNs de baixa ionização, refletindo diretamente suas condições físicas.

Apesar da abordagem adotada ter permitido a definição de uma separação visual entre LINERs e outras AGNs nos diagramas envolvendo as razões [Fe II]/Pa β e [C I]/Pa β , essa distinção não foi possível nos diagramas construídos com a razão [P II]/Pa β (ver Figura 3.7). Essa limitação pode estar relacionada a diversos fatores. Em primeiro lugar, a linha de emissão de [P II] tende a ser intrinsecamente mais fraca do que as de [Fe II] ou [C I], o que compromete a sensibilidade do diagrama à variação nos mecanismos de excitação e pode acarretar maiores incertezas nas medidas de fluxo. Além disso, a distribuição das fontes nos diagramas com fósforo revelou uma sobreposição significativa entre os objetos identificados como LINERs e os demais tipos de AGNs, sem uma tendência clara de segregação espacial entre as classes. Isso sugere que a razão [P II]/Pa β apresenta menor poder discriminante no contexto das LINERs, possivelmente por ser menos sensível a processos como choques e ionização por fótons de alta energia, que são relevantes nesse tipo de objeto. Consequentemente, não foi possível estabelecer uma linha tracejada representando

uma separação visual confiável nesses casos, como feito nos demais diagramas.

Vale destacar também o caso da galáxia NGC 4258, que não pôde ser incluída no diagrama Fe2H2 proposto por [Rodríguez-Ardila *et al.* \(2004\)](#) devido à ausência de medidas confiáveis para a linha H₂ 2.122 μ m. No entanto, ao ser posicionada nos diagramas de diagnósticos em NIR discutidos por [Calabrò *et al.* \(2023\)](#), a fonte foi classificada como LINER, em concordância com o que é amplamente reportado na literatura. Esse resultado mostra a consistência das novas propostas de classificação em NIR e a utilidade desses diagramas na identificação confiável de objetos de baixa ionização, mesmo em casos onde certos parâmetros espectrais não estão disponíveis.

De modo geral, os resultados obtidos, especialmente os diagramas de diagnóstico CIS3 e Fe2S3- β , demonstram um potencial considerável para a identificação de galáxias do tipo LINER no infravermelho próximo. A concentração dessas fontes em regiões específicas do plano diagnóstico, aliada à consistência com classificações baseadas em outros métodos (como o diagrama Fe2H2), sugere que essas ferramentas são sensíveis às características espectrais distintivas de objetos de baixa ionização. Ainda que os diagramas não tenham sido originalmente concebidos com o objetivo de distinguir LINERs, sua aplicação empírica revelou padrões recorrentes, capazes de auxiliar na caracterização física desses núcleos. Assim, os diagramas CIS3 e Fe2S3- β se consolidam como abordagens promissoras e complementares aos métodos tradicionais, sobretudo em casos onde a baixa qualidade espectral ou a ausência de determinadas linhas limita o uso de classificações mais convencionais.

Convém, no entanto, salientar uma limitação importante: algumas transições, em particular linhas de fósforo e de carbono, apresentam parâmetros atômicos menos bem determinados nas bases de dados utilizadas por códigos de fotoionização como o Cloudy (ver, por exemplo, [Riffel *et al.* 2019](#)). Por esse motivo, adotamos interpretações conservadoras quando conclusões quantitativas dependem criticamente de razões envolvendo P ou C. Futuramente, pretendemos explorar essas transições de forma mais detalhada, avaliando a sensibilidade dos diagramas a diferentes conjuntos de parâmetros atômicos e testando a robustez das classificações obtidas.

3.3 Avermelhamento

Em estudos de regiões centrais de galáxias ativas, a presença de poeira interestelar é um fator significativo que pode alterar os fluxos observados das linhas de emissão. Esse fenômeno, conhecido como avermelhamento, resulta da absorção seletiva da radiação em diferentes comprimentos de onda, e sua compreensão é fundamental para a interpretação precisa dos dados espectrais. A quantificação do avermelhamento é viabilizada pelo uso de razões entre linhas de emissão com razões intrínsecas bem estabelecidas e que estejam suficientemente separadas no espectro. O infravermelho próximo é particularmente

vantajoso para essa análise, pois apresenta menor sensibilidade à extinção por poeira em comparação com o óptico, permitindo uma investigação mais robusta das condições do gás.

3.3.1 Quantificação e Comparação do Avermelhamento

Neste trabalho, utilizamos dois pares de linhas de emissão para estimar o valor de $E(B - V)$: a razão entre as linhas de recombinação do hidrogênio $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ e a razão entre as linhas proibidas de $[\text{Fe II}]$ $1.257\ \mu\text{m}/1.644\ \mu\text{m}$. As expressões para o cálculo, baseadas na lei de extinção de [Cardelli *et al.* \(1989b\)](#), são:

$$E(B - V)_{\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma} = 5,22 \times \log \left(\frac{5,88}{F_{\text{Pa}\beta}/F_{\text{Br}\gamma}} \right), \quad (3.2)$$

$$E(B - V)_{[\text{Fe II}]} = 8,22 \times \log \left(\frac{1,25}{F_{1.257}/F_{1.644}} \right), \quad (3.3)$$

onde $F_{\text{Pa}\beta}$ e $F_{\text{Br}\gamma}$ correspondem aos fluxos observados das linhas de recombinação do hidrogênio $\text{Pa}\beta$ ($1.282\ \mu\text{m}$) e $\text{Br}\gamma$ ($2.166\ \mu\text{m}$), respectivamente, enquanto $F_{1.257}$ e $F_{1.644}$ referem-se aos fluxos observados das linhas proibidas de $[\text{Fe II}]$ em $1.257\ \mu\text{m}$ e $1.644\ \mu\text{m}$. Os valores 5,88 e 1,25 são as razões intrínsecas entre as respectivas linhas, conforme [Rodríguez-Ardila *et al.* \(2017\)](#). Os valores de $E(B - V)$ calculados para cada galáxia da amostra estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Valores de avermelhamento $E(B - V)$ calculados a partir das razões $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ e $[\text{Fe II}]$ $1.257\ \mu\text{m}/1.644\ \mu\text{m}$, com seus respectivos erros.

Galáxia	$E(B - V)_{\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma}$	$E(B - V)_{[\text{Fe II}]}$
NGC 2655	0.00	0.89 ± 0.55
NGC 0404	0.48	1.26 ± 0.78
NGC 1052	0.00	0.29 ± 0.62
NGC 1167	1.99	0.00
NGC 1961	2.65	1.41 ± 0.65
NGC 2273	1.06 ± 0.79	1.44 ± 0.32
NGC 3031	0.87 ± 0.71	0.08 ± 0.56
NGC 3079	4.54 ± 1.30	2.23 ± 0.55
NGC 4395	0.00	0.91 ± 0.38
NGC 3147	2.53 ± 1.01	0.00
NGC 4579	0.23	0.00
NGC 4750	1.64	0.44 ± 1.15
NGC 5005	1.61	0.47 ± 0.69
NGC 5194	2.30 ± 0.55	0.16 ± 0.54
NGC 6500	2.65 ± 0.67	0.54 ± 0.80
NGC 7217	2.66	0.00
NGC 7469	0.56 ± 0.39	0.00
NGC 4388	1.76 ± 0.10	1.64 ± 0.29
NGC 2639	—	0.13 ± 0.52
NGC 3998	—	0.21 ± 0.54
NGC 4450	—	0.00
NGC 5033	—	0.00
NGC 5273	—	0.32 ± 1.18
NGC 4235	—	1.51 ± 0.93
NGC 4258	—	1.79 ± 0.87

Nota. Valores negativos de $E(B - V)$, que não são fisicamente possíveis, foram substituídos por “0.00” na tabela.

Os valores derivados da razão $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ tendem a ser mais elevados em vários objetos, como NGC 3079, NGC 7217 e NGC 1961, com $E(B - V) > 2$. Em contraste, os resultados baseados em $[\text{Fe II}]$ exibem maior dispersão, incluindo alguns valores negativos. Por definição, $E(B - V)$ representa um excesso de cor, então valores negativos não possuem interpretação física direta. Por essa razão, adotamos a convenção de interpretá-los como zero. Tais valores negativos indicam que a razão de fluxo observada entre as linhas $[\text{Fe II}] \lambda 1.257 \mu\text{m}$ e $\lambda 1.644 \mu\text{m}$ excede a razão teórica esperada, o que pode ser atribuído a diferentes fontes de incerteza: erros de calibração, subtração inadequada do contínuo estelar, contaminação por linhas vizinhas, ou ainda flutuações estatísticas em espectros com baixa razão sinal-ruído. Além disso, trabalhos como [Rodríguez-Ardila *et al.* \(2004\)](#) destacam que a razão intrínseca de $[\text{Fe II}]$ pode variar conforme as condições físicas locais do gás, como densidade eletrônica e temperatura, contribuindo para a dispersão observada.

A Figura 3.8 compara os dois métodos, apresentando os valores de extinção $E(B - V)$ de $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ (eixo x) *vs.* $[\text{Fe II}] \lambda 1.257 \mu\text{m}/\lambda 1.644 \mu\text{m}$ (eixo y). O losango vermelho (na origem) indica a condição intrínseca de ausência de extinção ($E(B - V) = 0$), com base nos valores teóricos esperados para as razões de linha. A linha tracejada azul, com losangos a cada 0.5 magnitudes, representa a sequência teórica de avermelhamento conforme [Cardelli *et al.* \(1989a\)](#) para $R_V = 3.1$. Essa linha assume que a poeira afeta igualmente as regiões emissoras de $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ e $[\text{Fe II}]$, ou seja, $E(B - V)_{\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma} = E(B - V)_{[\text{Fe II}]}$.

Cada ponto colorido no gráfico corresponde a uma galáxia da amostra, e seus formatos indicam subgrupos de objetos (LINERs, Seyferts, etc.). As barras de erro horizontais e verticais representam as incertezas nas razões de linha. A dispersão significativa dos pontos em relação à linha de consistência aponta que os métodos nem sempre produzem valores de extinção equivalentes. Essa diferença pode estar relacionada ao fato de que as linhas de recombinação de H I ($\text{Pa}\beta$, $\text{Br}\gamma$) e as de $[\text{Fe II}]$ não se originam exatamente nas mesmas regiões do gás fotoionizado. As linhas de H I tendem a ser formadas nas zonas mais próximas da fonte ionizante – mais embebidas em poeira nuclear –, enquanto $[\text{Fe II}]$ surge predominantemente em regiões parcialmente ionizadas, mais externas e, em média, menos obscurecidas. Assim, as diferenças sistemáticas entre os métodos refletem principalmente a distribuição espacial e as variações de densidade e ionização do gás, em vez de serem necessariamente indícios diretos da presença de choques.

A análise da Tabela 3.4 e do gráfico mostra que, de modo geral, os valores de $E(B - V)_{[\text{Fe II}]}$ tendem a ser inferiores aos obtidos via $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$, reforçando a interpretação de que as regiões emissoras de $[\text{Fe II}]$ se encontram mais externas ou sofrem menor obscurecimento pela poeira interestelar. Em casos como NGC 3079 (ID 14), essa discrepância é marcante, com valores de extinção derivados de $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ muito maiores que os de $[\text{Fe II}]$. Em contrapartida, alguns objetos demonstram uma notável concordância entre os métodos. Galáxias como NGC 2273 (ID 12) e NGC 4388 (ID 7) se destacam por apresentar valores de $E(B - V)$ que se alinham bem com o vetor de avermelhamento ideal, indicando uma

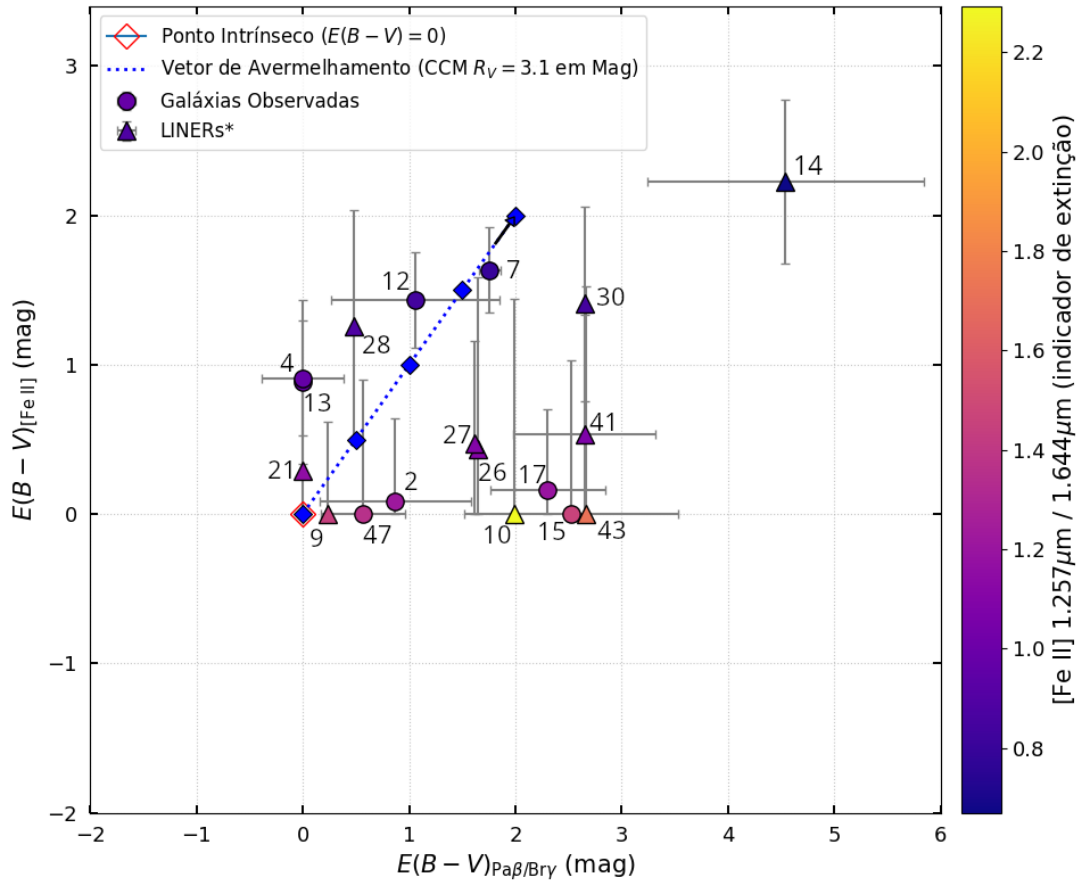


Figura 3.8: Diagrama de comparação entre os valores de extinção $E(B - V)$ obtidos a partir das razões de linha $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ (eixo x) e $[\text{Fe II}] 1.257 \mu\text{m}/1.644 \mu\text{m}$ (eixo y). Os pontos no gráfico representam as galáxias da amostra deste trabalho para as quais foi possível calcular o avermelhamento (como na Tabela 3.4). Os triângulos indicam os objetos identificados como LINERs a partir do diagrama Fe2H2 . O ponto vermelho representa o caso intrínseco ($E(B - V) = 0$) e a linha pontilhada azul mostra a sequência teórica de avermelhamento baseada em [Cardelli *et al.* \(1989a\)](#). As cores dos pontos indicam os valores da razão de linha $[\text{Fe II}] 1.257 \mu\text{m} / 1.644 \mu\text{m}$, como indicador de extinção. Os números referem-se aos IDs dos objetos, conforme definidos na Tabela 2.1.

excelente compatibilidade entre as duas abordagens. Além dessas, outras galáxias também exibem boa compatibilidade entre os métodos quando as barras de erro são consideradas, com seus intervalos de incerteza se sobrepondo à linha de consistência.

Apesar dessas tendências, há fatores observacionais que limitam a comparação direta dos dois métodos. Em muitos objetos, a linha $\text{Br}\gamma$ apresenta baixo sinal-ruído, aumentando as incertezas ou impedindo a detecção — o que explica os valores nulos ou ausentes na Tabela 3.4. Essa limitação é especialmente relevante em LINERs, onde $\text{Br}\gamma$ tende a ser intrinsecamente fraca no NIR. Já a razão $[\text{Fe II}] 1.257/1.644 \mu\text{m}$ mostrou-se mais robusta, pois ambas as linhas são relativamente intensas e menos afetadas pela absorção estelar, sendo mais confiável nesses casos.

Em síntese, a comparação evidencia que as discrepâncias refletem principalmente di-

ferências nas regiões emissoras de cada linha, enquanto a concordância em vários objetos confirma o papel relevante da poeira na atenuação. O fato de que $E(B - V)_{[\text{Fe II}]}$ tende a ser igual ou inferior ao derivado de $\text{Pa}\beta/\text{Br}\gamma$ reforça a conclusão de que a emissão de $[\text{Fe II}]$ nesta amostra é majoritariamente produzida por fotoionização, e não por choques.

3.3.2 As Linhas de $[\text{Fe II}]$ como Indicadores de Extinção

A cor dos pontos na Figura 3.8 representa os valores observados da razão de linha $[\text{Fe II}]$ $1.257 \mu\text{m} / 1.644 \mu\text{m}$, conforme indicado na barra de cores lateral. Essa razão é especialmente útil no contexto do infravermelho próximo, pois ambas as linhas envolvidas partem do mesmo nível excitado superior ($a^4D_{7/2}$), sendo transições para os níveis inferiores $a^6D_{9/2}$ e $a^4F_{9/2}$, respectivamente. Por isso, a razão entre suas intensidades é teoricamente fixa, determinada apenas por parâmetros atômicos como o coeficiente de emissividade, e não depende da densidade eletrônica nem da temperatura do gás (Bautista e Pradhan, 1998).

O valor teórico amplamente aceito para essa razão é de aproximadamente 1.25 (Rodríguez-Ardila *et al.*, 2017), assumindo condições ideais e parâmetros atômicos bem determinados. Para a amostra deste trabalho, composta pelos objetos com medições válidas das duas linhas, foi obtida uma média de:

$$\left\langle \frac{[\text{Fe II}] 1.257}{[\text{Fe II}] 1.644} \right\rangle \approx 1.17 \pm 0.27$$

Esse valor é ligeiramente inferior ao previsto teoricamente, com uma diferença de cerca de 6.4%. Essa discrepância pode ser interpretada de duas formas principais:

- **Extinção moderada:** Se considerarmos o valor teórico de 1.25 como correto, então a razão média observada de 1.17 indica a presença de extinção moderada nas regiões emissores de $[\text{Fe II}]$. Aplicando a lei de extinção de Cardelli *et al.* (1989a), essa diferença corresponderia a valores típicos de A_V em torno de 1 a 2, consistentes com a presença de poeira, mas menos intensos do que aqueles encontrados em outros estudos.
- **Incertezas nos parâmetros atômicos:** Alternativamente, a diferença pode refletir incertezas nos coeficientes de transição das linhas proibidas de Fe^+ , como discutido por Rodríguez-Ardila *et al.* (2004), destacando as dificuldades envolvidas na determinação precisa desses valores.

Para fins comparativos, vale mencionar que Rodríguez-Ardila *et al.* (2004), analisando uma amostra independente de AGNs, reportaram uma média de ~ 0.98 para essa mesma razão, aproximadamente 30% abaixo do valor teórico. Eles interpretaram essa discrepância como evidência de extinção significativa ($A_V \sim 3.7$) afetando as regiões emissores de

[Fe II]. A média mais alta obtida neste trabalho sugere que, embora a extinção esteja presente, ela é consideravelmente menor do que aquela inferida por eles.

Em síntese, a razão [Fe II] 1.257/1.644 medida nesta amostra indica um nível moderado de avermelhamento e mostra comportamento mais compatível com os valores teóricos do que os encontrados em outras amostras da literatura. Esses resultados reforçam o uso dessa razão como ferramenta para sondar a extinção diferencial em regiões emissores de linhas proibidas no infravermelho próximo, ao mesmo tempo em que evidenciam a necessidade de considerar incertezas nos valores atômicos e nas observações.

Capítulo 4

LINERs Tipo 1

Em AGNs, a presença simultânea de linhas de baixa ionização e de uma região de linhas largas caracteriza os chamados LINERs Tipo 1. Embora LINERs sejam comuns no universo local, os do Tipo 1 representam uma fração significativamente menor da população de núcleos ativos, tornando-se objetos particularmente interessantes para o estudo das fases intermediárias da atividade nuclear. Sua raridade pode refletir tanto limitações observacionais quanto transições evolutivas sutis entre diferentes classes de AGNs.

Essa combinação única de características (ionização fraca e presença de BLR) diferencia os LINERs Tipo 1 dos LINERs Tipo 2, que não apresentam linhas largas detectáveis, e dos Seyferts Tipo 1, que exibem linhas largas mais intensas associadas a uma ionização mais alta. Neste capítulo, aprofundamos a análise dos espectros NIR da nossa amostra, com foco na identificação e caracterização de LINERs Tipo 1, visando compreender melhor sua natureza física e seu papel no contexto unificado dos AGNs. A Seção 4.1 discute as principais características espectrais desses objetos, a Seção 4.2 apresenta os LINERs Tipo 1 identificados em nossa amostra, e, por fim, a Seção 4.3 aborda a cinemática do gás nesses núcleos.

4.1 Características Espectrais

A análise de espectros no NIR tem se mostrado crucial para a reclassificação de diversos núcleos, muitos dos quais eram anteriormente categorizados como Seyferts em estudos ópticos (Ho *et al.*, 1997). Observações no NIR, como as de Mason *et al.* (2015), revelaram propriedades mais consistentes com LINERs, sublinhando a importância de se utilizar diferentes faixas do espectro eletromagnético para uma classificação precisa de AGNs. Entre as principais assinaturas espectrais dessa reclassificação, destaca-se a ausência de linhas de alta ionização (linhas coronais), típicas de núcleos Seyfert. Adicionalmente, observa-se um número reduzido de linhas de emissão nos espectros NIR, em contraste com a riqueza espectral dos Seyferts, o que é compatível com a natureza dos LINERs, cujos

espectros tendem a ser mais fracos e menos ionizados (Rodríguez-Ardila *et al.* 2005, Riffel *et al.* 2013b). Essas propriedades evidenciam um meio de baixa excitação e sustentam a classificação como LINERs.

Apesar da baixa ionização geral, em alguns casos detecta-se a presença de linhas de emissão largas, especialmente em transições do hidrogênio como Pa β 1.282 μm , Br γ 2.166 μm e da linha de He I 1.083 μm . Essas linhas largas indicam a existência de uma BLR e, segundo o modelo unificado de AGNs (§1.1.1), sua observação direta implica uma linha de visada livre de obstruções pelo toro de poeira (Antonucci, 1993). Dessa forma, a combinação da baixa ionização típica dos LINERs com a presença de uma BLR — característica dos Seyferts Tipo 1 — leva à classificação desses objetos como LINERs Tipo 1.

Evidências adicionais indicam que uma fração significativa dos LINERs é de fato alimentada por acreção em SMBHs. O levantamento de LINERs locais conduzido por Cazoli *et al.* (2018) revelou a presença quase universal de BLRs, reforçando fortemente a interpretação de que o mecanismo de excitação nesses casos está associado à atividade de um AGN. De forma complementar, a análise de dados em raios X de, aproximadamente, oitenta LINERs realizada por Márquez *et al.* (2017) mostrou que 60–80% desses núcleos podem ser considerados AGNs genuínos. Esses autores também verificaram que LINERs brilhantes apresentam propriedades espectroscópicas no infravermelho médio semelhantes às dos Seyferts Tipo 2, enquanto LINERs mais fracos possivelmente perdem o toro de poeira. Além disso, imagens obtidas com o HST revelam morfologias em cone ou núcleo-halo, compatíveis com a presença de *outflows*.

Além das propriedades espectrais, a SED desses objetos também reforça sua natureza distinta. Enquanto Seyferts geralmente apresentam um excesso marcante no ultravioleta (o *big blue bump*), associado a discos de acreção radiativamente eficientes, os LINERs tendem a exibir uma SED globalmente mais fraca nesse regime, com picos deslocados para comprimentos de onda maiores (Ho, 2008). Esse comportamento sugere uma taxa de acreção mais baixa, compatível com os modelos de fluxo de acreção dominado por advecção (ADAFs), reforçando a natureza menos energética e menos eficiente dos LINERs em comparação com os Seyferts.

Em síntese, a classificação desses objetos como LINERs Tipo 1 baseia-se na análise conjunta de suas propriedades espectrais no infravermelho e da forma da sua SED. Tais características apontam para núcleos de baixa luminosidade e menor eficiência de ionização, mas que ainda permitem uma visada direta à BLR.

4.2 Identificação de LINERs Tipo 1 em Nossa Amostra

Em nossa amostra, identificamos seis galáxias classificadas como LINERs Tipo 1: NGC 1052, NGC 3998, NGC 4203, NGC 4258, NGC 445 e NGC 3031. A

classificação desses núcleos é fundamentada na presença de componentes largas nas linhas He I $1.083 \mu\text{m}$, Pa β $1.2818 \mu\text{m}$ e Br γ $2.1655 \mu\text{m}$, observadas nos espectros obtidos no NIR. Esses traços indicam a existência de BLRs ativas. Adicionalmente, essas galáxias também exibem, em sua maioria, componentes largas na linha H α (6563\AA) no domínio óptico, como reportado por Ho *et al.* (1997), o que reforça a identificação da natureza ativa de seus núcleos.

Os LINERs Tipo I analisados neste trabalho mostram várias características em múltiplos comprimentos de onda que os diferenciam de AGNs mais luminosos, como as Seyfert. De modo geral, esses objetos apresentam acréscimo radiativamente ineficiente, resultando em baixas luminosidades bolométricas ($L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} \ll 10^{-3}$, Ho 2008). Esse regime de acreção é caracterizado por uma forte emissão em rádio, com a presença de jatos relativísticos, e raios-X, mas com uma supressão notável de emissão no UV e infravermelho médio. O espectro em raios-X é frequentemente descrito por uma lei de potência com índice plano a moderado, sem evidência de uma componente de reflexão proeminente ou da linha FeK α ¹ forte, típicos de AGNs com discos de acreção finos e eficientes. A ausência do *big blue bump* no UV e de um pico de emissão no infravermelho médio (associado a um toro de poeira aquecido) são assinaturas claras desse tipo de acreção. A seguir, detalhamos as particularidades de cada galáxia, destacando como essas propriedades gerais se manifestam em cada caso.

4.2.1 Análise detalhada dos objetos LINER Tipo 1

- Galáxia NGC 1052

A galáxia elíptica NGC 1052 é um dos LINERs mais estudados, graças à sua intensa atividade nuclear e à emissão detectada em múltiplas faixas do espectro eletromagnético. No óptico, o espectro apresenta linhas de emissão estreitas, típicas de regiões de baixa ionização, além de uma clara componente larga em H α (Ho *et al.*, 1997), evidência da presença de uma BLR. Observações com alta resolução espacial (HST/STIS) medem para essa componente um FWHM de $\sim 2240 \text{ km/s}$, confirmando sua classificação como LINER Tipo 1 (Balmaverde e Capetti, 2014).

No infravermelho próximo, há registros de observações espectroscópicas e de imagem para a NGC 1052. Dahmer-Hahn *et al.* (2019) realizaram espectroscopia integral (óptico+NIR), identificando múltiplos componentes de gás e poeira, enquanto Fernández-Ontiveros *et al.* (2011) reportaram fontes pontuais no núcleo, associadas a aglomerados

¹A linha FeK α é uma linha de emissão fluorescente produzida quando um elétron da camada K do ferro é ejetado (por exemplo, por fótons de alta energia), e um elétron da camada L preenche a vaga, emitindo um fóton com energia característica de $\sim 6,4 \text{ keV}$ no caso do ferro neutro. Essa linha é comumente observada em núcleos ativos e pode fornecer informações sobre a geometria, composição e dinâmica do material próximo ao buraco negro.

estelares, em imagens NIR de alta resolução. Entretanto, até onde verificamos, não há relatos prévios de detecção direta de linhas largas associadas à BLR no NIR — as evidências existentes derivam de observações no óptico (e polarimetria).

No espectro NIR obtido neste trabalho, são identificadas linhas como [S III] $0.953 \mu\text{m}$ e [Fe II] $1.257 \mu\text{m}$, além de possíveis alargamentos em He I $1.083 \mu\text{m}$, Pa γ $1.094 \mu\text{m}$ e Pa β $1.282 \mu\text{m}$, sugerindo que a BLR também pode ser detectável nesta faixa espectral (Mason *et al.*, 2015). A Figura 4.1 mostra, no painel superior, o espectro óptico obtido de Ho *et al.* (1997), evidenciando a componente larga em H α , já no painel inferior, o espectro NIR obtido nesta análise, no qual diversas linhas características de LINERs são identificadas, com indícios de alargamento compatíveis com emissão da BLR.

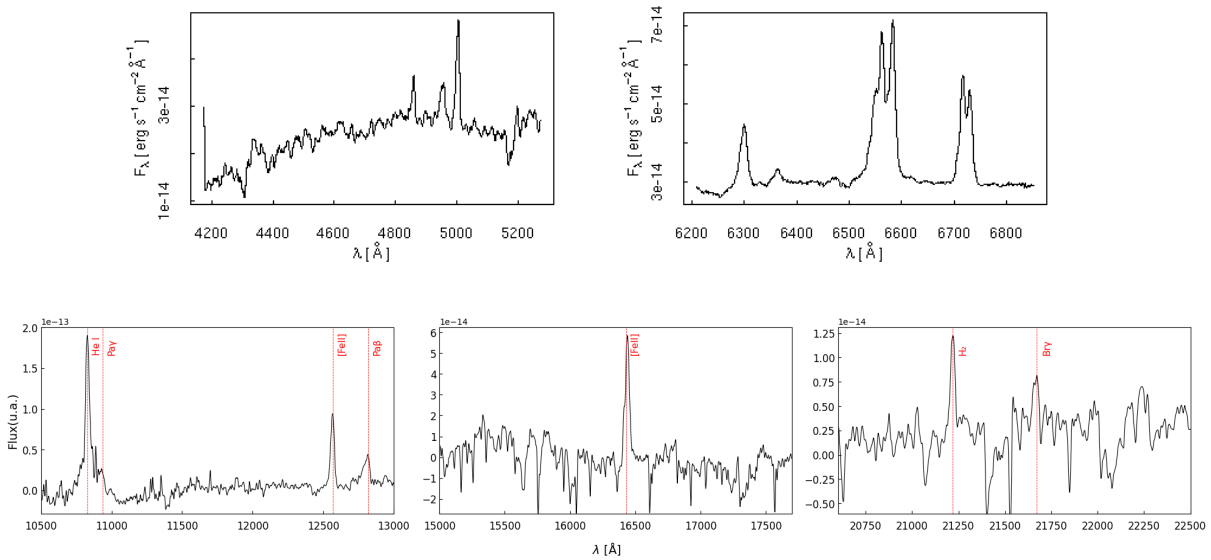


Figura 4.1: Na parte superior, espectros ópticos da galáxia NGC 1052 obtidos por Ho *et al.* (1997), a partir da amostra do survey Palomar. Observam-se linhas de emissão estreitas, típicas de regiões de baixa ionização, além de uma componente larga em H α (6563\AA), característica de LINERs do Tipo 1. Na parte inferior, apresentamos o espectro NIR da mesma galáxia, no qual são identificadas componentes largas em He I ($1.083 \mu\text{m}$), Pa γ ($1.094 \mu\text{m}$) e Pa β ($1.282 \mu\text{m}$).

Para investigar essas possíveis componentes largas, realizamos ajustes multi-componentes gaussianos nas regiões espectrais correspondentes às linhas He I e Pa β (Figura 4.2). As gaussianas em azul representam as componentes estreitas e largas ajustadas, evidenciando a presença de uma BLR nesta galáxia. A linha Pa γ (primeiro painel) não pôde ser medida de forma confiável devido à interferência da banda CN, que absorve parcialmente a emissão e não é bem representada pelas SSPs utilizadas na síntese espectral.

A partir desses ajustes, obtivemos a dispersão de velocidades e larguras de linha das componentes largas, listadas na Tabela 4.1. Estes resultados representam, até onde verificamos, a primeira determinação de parâmetros cinemáticos da BLR de NGC 1052 no

NIR, complementando as evidências ópticas já existentes e trazendo uma nova perspectiva sobre a física desta região.

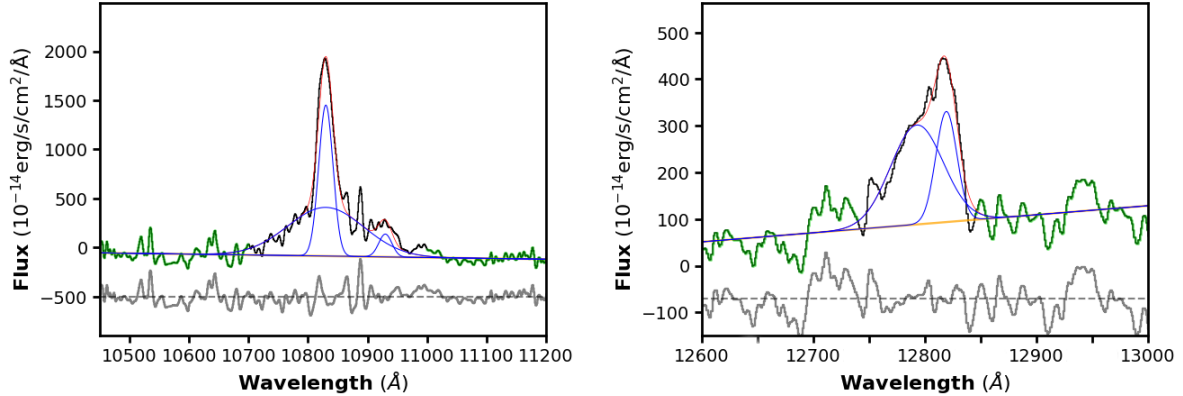


Figura 4.2: Ajustes multi-componentes das linhas de emissão na galáxia NGC 1052. À esquerda, o ajuste da região espectral contendo as linhas He I $1.083 \mu\text{m}$ e Pa γ $1.094 \mu\text{m}$. À direita, o ajuste da linha Pa β $1.282 \mu\text{m}$. Em ambos os painéis, o espectro observado é mostrado em preto, o ajuste final em vermelho, as gaussianas individuais em azul e o espectro de base em verde. A presença de uma componente larga em Pa β indica emissão proveniente da BLR. Fonte: Autora.

A distribuição espectral de energia da NGC 1052, no rádio, apresenta características notáveis. Observações em alta resolução revelaram emissão de megamasers de H_2O localizados a apenas $\sim 0,04$ pc do centro galáctico (Claussen *et al.*, 1998). Esses masers, associados a gás molecular denso em rotação, sugerem a presença de um disco gasoso muito próximo ao buraco negro supermassivo. No entanto, imagens de interferometria de base muito longa (VLBI, do inglês *Very Long Baseline Interferometry*) mostram que os masers estão alinhados com os jatos de rádio, e não com um disco de acreção convencional – comportamento atípico quando comparado a sistemas como NGC 4258.

Em raios X, NGC 1052 exibe um núcleo ativo fortemente obscurecido, com espectro do tipo lei de potências e índice espectral plano ($\Gamma \sim 0,2$ na faixa de 1.5–6 keV), compatível com absorção intrínseca complexa por colunas densas de gás ($N_H \gtrsim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$, Weaver *et al.* 1999) e um fluxo de acreção ineficiente do tipo RIAF, dominado por emissão de jato relativístico (e.g., Hernández-García *et al.* 2013; González-Martín *et al.* 2014). A luminosidade nuclear intrínseca no intervalo de 2–10 keV é estimada em $\sim 8 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$. Observações com os satélites *Suzaku*, *XMM-Newton* e *NuSTAR* revelam uma linha FeK α com componentes estreita e alargada, sem evidência clara de reflexão, sugerindo origem próxima à base do jato (Brenneman *et al.*, 2009; Falocco *et al.*, 2020; Osorio-Clavijo *et al.*, 2020).

Além da emissão nuclear, há uma componente difusa de raios X suaves ($\lesssim 2$ keV), espacialmente coincidente com os lóbulos de rádio e interpretada como plasma térmico aquecido por choques do jato com o meio intergaláctico (Kadler *et al.*, 2004). A variabilidade observada em escalas de meses a anos é atribuída a um meio absorvedor não

homogêneo, com estrutura *clumpy*, o que reforça o cenário de jato dominante na emissão (Osorio-Clavijo *et al.*, 2020). Evidências adicionais da influência do jato vêm da presença de um *outflow* de gás ionizado, identificado por Cazzoli *et al.* (2020), com massa de $\sim 1.6 \times 10^5 M_{\odot}$ e taxa de ejeção de $\sim 0.4 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Esse fluxo estaria imerso em um casulo turbulento e pode estar associado à formação de bolhas de emissão polar em escalas de kiloparsec.

A Figura 4.3 apresenta a comparação entre a distribuições espectral de energia da NGC 1052 (círculos azuis) e da Seyfert Tipo 1 NGC 7469 (quadrados vermelhos). Embora ambas apresentem BLR, a NGC 7469 exibe um claro excesso no ultravioleta e no infravermelho médio, típico de AGNs com acreção eficiente e emissão intensa do toro de poeira aquecido. Por outro lado, a NGC 1052 mostra uma SED dominada por emissão em rádio e raios X, com com um déficit de ftons no UV, quando comparada com um AGN de Tipo I clássico.

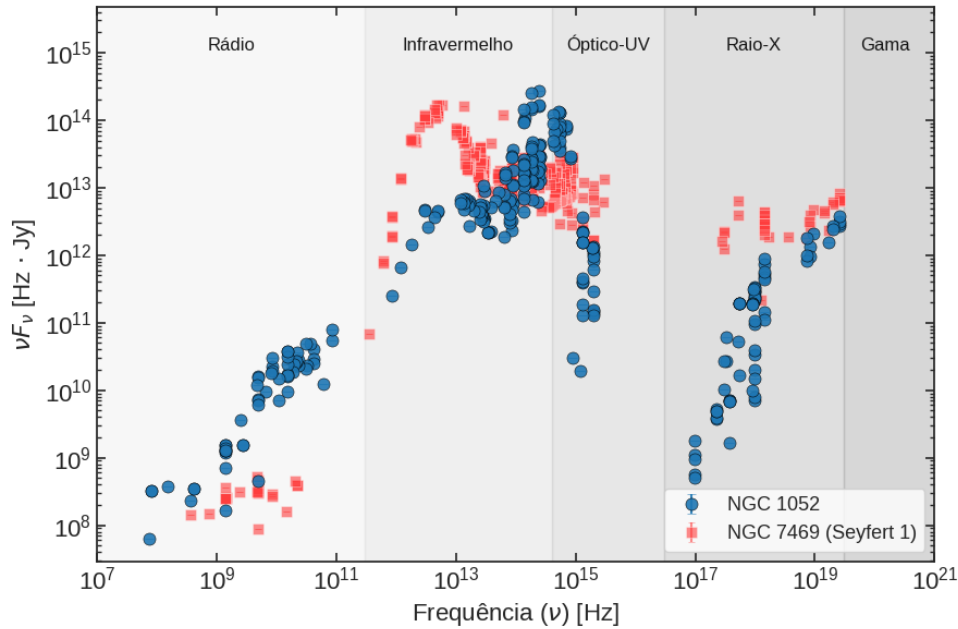


Figura 4.3: Distribuição espectral de energia das galáxias NGC 1052 (círculos azuis) e NGC 7469 (quadrados vermelhos) para comparação. A NGC 1052 é uma LINER Tipo 1 e a NGC 7469 é uma Seyfert Tipo 1. Fonte: Autora.

• Galáxia NGC 3998

A galáxia lenticular NGC 3998 é conhecida por apresentar variabilidade nuclear em escalas de tempo curtas nos domínios de rádio (Hummel *et al.* 1984; Filho *et al.* 2002), ultravioleta (Maoz *et al.*, 2005) e raios X (Younes *et al.* 2012; Hernández-García *et al.* 2013). No óptico, o espectro de Ho *et al.* (1997) revela a presença clara de componentes largas em $H\alpha$ (6563Å), como visto na Figura 4.4. No ultravioleta, dados do satélite IUE (do inglês, *International Ultraviolet Explorer*) mostram uma emissão pontual e espectralmente plana no contínuo, além da detecção da linha de Mg II 2800Å com largura de

~ 8600 km/s, compatível com a componente larga, reforçando a classificação como LINER Tipo 1 (Reichert *et al.*, 1992).

No espectro NIR, obtido neste trabalho, é possível detectar diversas linhas de emissão, incluindo [S III] $0.953 \mu\text{m}$ e [Fe II] $1.257 \mu\text{m}$ e, com componentes largas, He I ($1.083 \mu\text{m}$), Pa γ ($1.094 \mu\text{m}$) e Pa β ($1.282 \mu\text{m}$). Os espectros (óptico e NIR) da NGC 3998 são apresentados na Figura 4.4, onde se observa claramente as componentes largas em ambas as faixas.

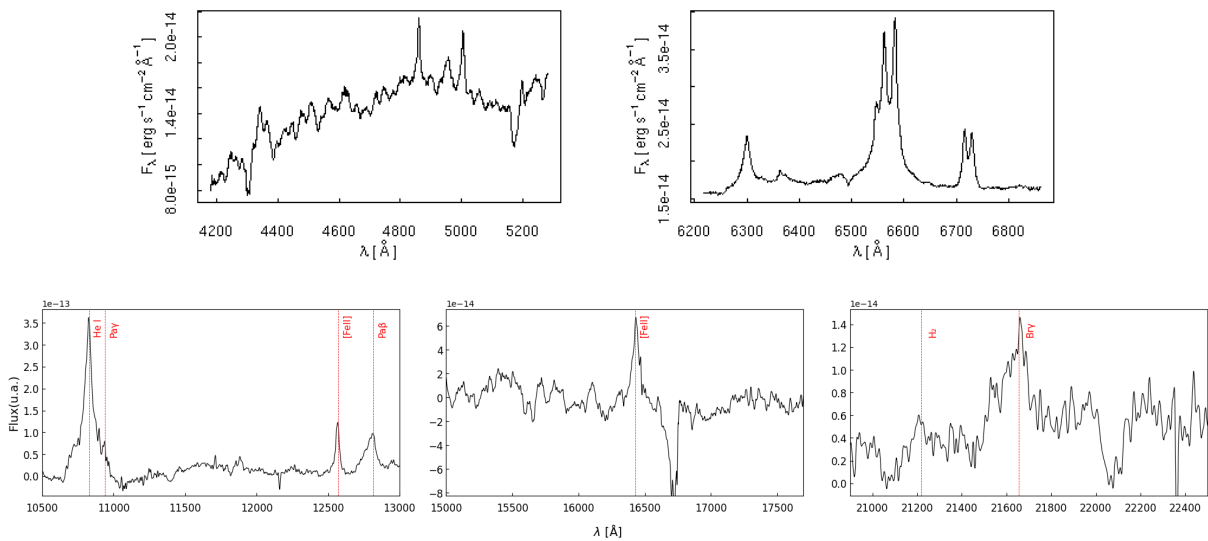


Figura 4.4: Espectros da galáxia NGC 3998. As imagens superiores mostram os espectros ópticos obtidos por Ho *et al.* (1997), evidenciando linhas de emissão estreitas e a clara componente larga em H α (6563\AA). A imagem inferior apresenta o espectro NIR obtido neste trabalho, onde se identificam componentes largas em He I ($1.083 \mu\text{m}$), Pa γ ($1.094 \mu\text{m}$) e Pa β ($1.282 \mu\text{m}$), características de LINERs do Tipo 1.

Na Figura 4.5 apresentamos o ajuste espectral das linhas He I e Pa β , com as componentes destacadas em azul, evidenciando a presença de um BLR fraco, porém detectável. No espectro, a linha de He I mostra uma assimetria, com a extremidade do perfil aparentemente suprimida, provavelmente devido à absorção estelar associada à banda molecular de CN, que se sobrepõe parcialmente à região da linha. Essa absorção pode ter reduzido a intensidade observada, afetando principalmente a componente larga de He I. A linha Pa γ , por sua vez, encontra-se praticamente totalmente absorvida pelo mesmo efeito, impossibilitando sua medição confiável. Dessa forma, a presença da banda de CN deve ser considerada ao interpretar a largura e a intensidade dessas linhas, pois pode levar à subestimação de suas contribuições reais no ajuste espectral.

Apesar deste objeto ser amplamente estudada no óptico — onde a presença da BLR já foi reportada —, não encontramos registros na literatura de detecção de linhas largas no NIR associadas à BLR. Assim, este trabalho apresenta, até então, a primeira evidência

espectroscópica dessa componente nessa faixa espectral, cujos parâmetros cinemáticos estão listados na Tabela 4.1.

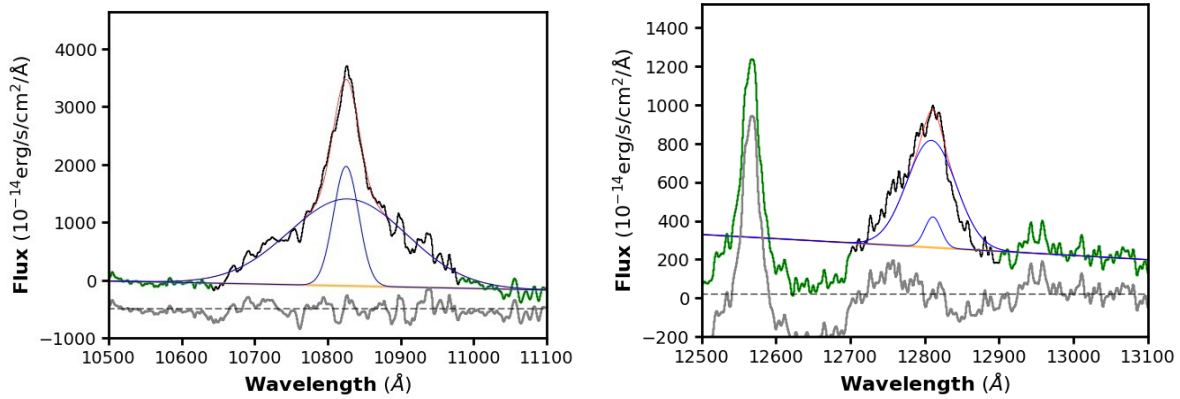


Figura 4.5: Ajuste espectral das linhas He I (esquerda) e Pa β (direita) em NGC 3998. As cores, em ambos os painéis, estão representadas como na Fig. 4.2. Nota-se que a linha Pa γ não pôde ser medida de forma confiável, pois encontra-se praticamente totalmente absorvida pela banda de CN. A componente larga de He I também pode estar parcialmente afetada por essa absorção. Fonte: Autora.

Dados de alta resolução revelam um excesso no infravermelho médio, compatível com emissão de poeira aquecida no núcleo ativo (Mason *et al.*, 2013). Em raios X, o espectro é bem descrito por uma lei de potência com índice moderado ($\Gamma \sim 1.9$), típico de processos não térmicos como o espalhamento Compton inverso. Não há evidência significativa da linha fluorescente de ferro em 6.4k eV (FeK α , com largura equivalente <25 eV), nem da componente de reflexão associada a discos frios, o que sugere um disco truncado e um fluxo de acreção do tipo RIAF, com o truncamento ocorrendo a $\sim 100\text{--}300 R_S$ (Ptak *et al.*, 2004; Younes *et al.*, 2019). Modelagens da SED indicam que a presença de um jato relativístico é essencial para explicar o excesso nas bandas de rádio e infravermelho médio (Ptak *et al.* 2004; Nemmen *et al.* 2014).

A emissão em rádio é dominada pelo núcleo compacto, mas também revela lóbulos em forma de “S” com extensão de ~ 20 kpc, observados pelo LOFAR (147MHz) e VLA (1.4 GHz) (Sridhar *et al.*, 2020). A alta razão núcleo/lóbulo (>0.9) sugere que o jato central segue ativo, possivelmente de forma intermitente. O índice espectral nos lóbulos ($\alpha \sim -0.6$) indica injeções recentes de partículas relativísticas ou dissipação contínua da energia do jato, descartando uma origem fossilizada.

A Figura 4.6 mostra a SED multibanda da NGC 3998 comparada à da galáxia Seyfert 1 NGC 7469. Nota-se que, enquanto a Seyfert apresenta o típico pico de emissão óptico/UV associado a um disco de acreção padrão, a NGC 3998 exibe um espectro mais defasado, com ausência desse pico e emissão mais discreta no UV–X, consistente com um cenário de RIAF. A emissão no infravermelho médio e rádio, no entanto, permanece significativa, indicando a contribuição de jatos relativísticos para esses domínios espectrais.

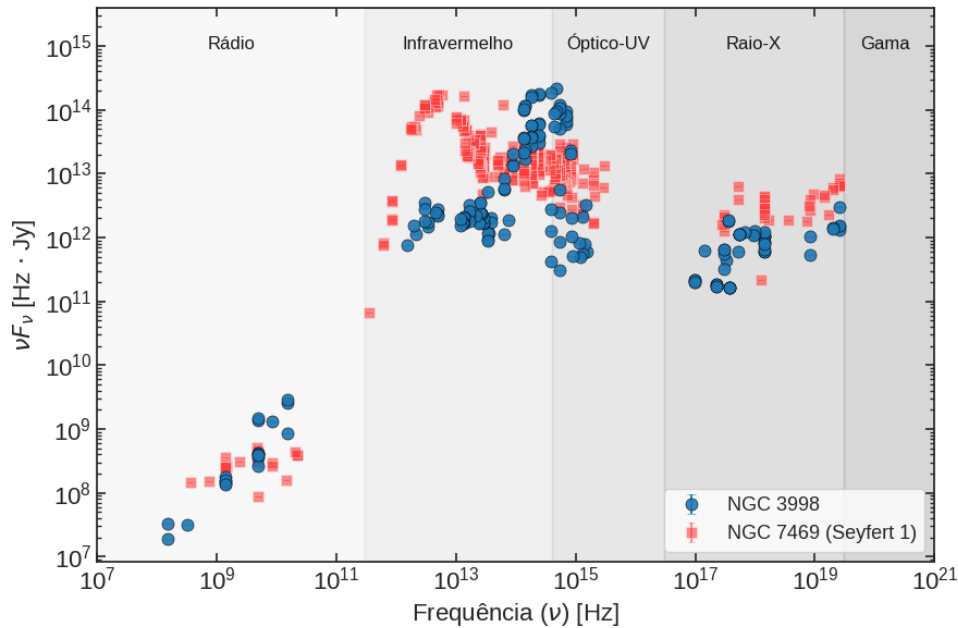


Figura 4.6: SED das galáxias NGC 3998 e NGC 7469. A NGC 3998 (círculos azuis) é uma LINER Tipo 1, enquanto a NGC 7469 (quadrados vermelhos) é uma Seyfert Tipo 1. A comparação destaca as diferenças nas formas espectrais entre esses dois tipos de AGNs. Fonte: Autora.

• Galáxia NGC 4203

NGC 4203 é uma galáxia lenticular (SAB0), vista quase de frente, que abriga um núcleo ativo classificado como LINER. Essa classificação é sustentada pela presença de uma linha larga de $H\alpha$ (6563\AA), com perfil *duplo-peaked* (de duplo pico), observada no espectro óptico de alta resolução (Ho *et al.*, 1997; Shields *et al.*, 2000), e confirmada pela detecção de componentes largas em diversas linhas no infravermelho próximo: He I ($1.083\ \mu\text{m}$), Pa γ ($1.094\ \mu\text{m}$) e Pa β ($1.282\ \mu\text{m}$). A Figura 4.7 apresenta os espectros ópticos obtidos por Ho *et al.* (1997) e o espectro NIR analisado neste trabalho. Apesar de um espectro infravermelho anterior não ter detectado linhas de emissão (Mould *et al.*, 2012), os dados atuais revelam claramente componentes largas, reforçando a natureza ativa e a classificação da NGC 4203 como LINER Tipo 1.

A linha $H\alpha$ de duplo pico é também variável: sua intensidade mudou por um fator ~ 2.2 entre 1999 e 2010, interpretação essa que associa a variabilidade a um anel de gás formado por disrupção tidal de uma supergigante vermelha a $\sim 1500\text{AU}$ do buraco negro, coexistindo com uma componente larga mais estável, possivelmente ligada a fluxo de gás em escala $\sim 1\text{pc}$ (Devereux, 2011).

Nos ajustes realizados, apresentados na Figura 4.8, a linha de Pa β (painel direito) apresenta perfil relativamente ruidoso e assimétrico, com indícios de duplo pico, sugerindo a existência de diferentes componentes cinemáticas no gás ionizado ou a influência de absorção/emissão provenientes de regiões distintas próximas ao núcleo. No painel à

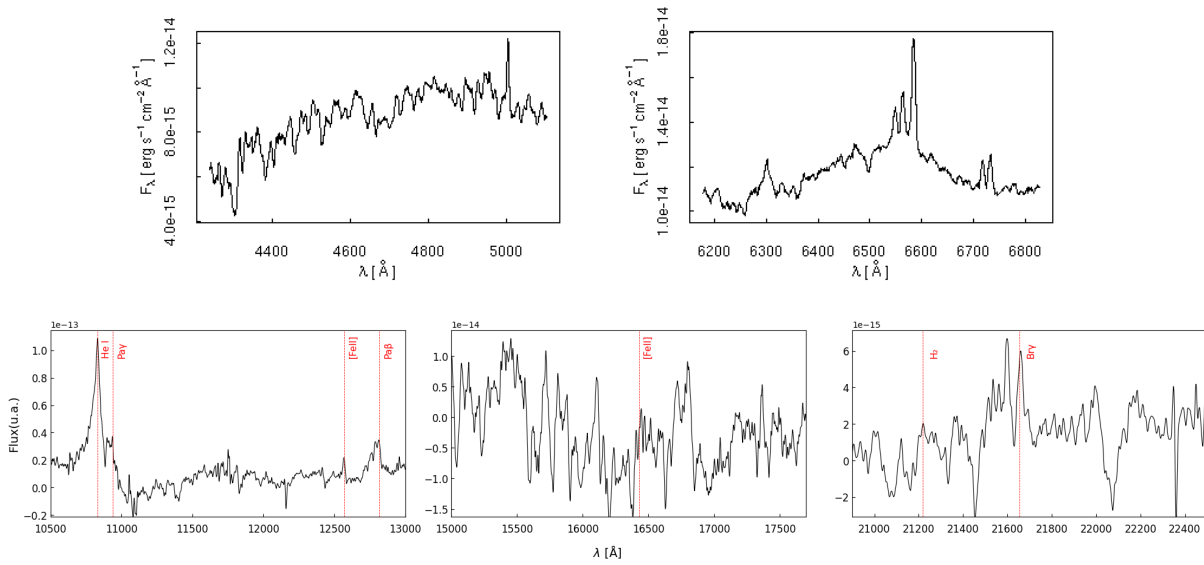


Figura 4.7: Espectros da galáxia NGC 4203. As figuras superiores mostram os espectros ópticos obtidos por [Ho *et al.* \(1997\)](#), a partir da amostra do observatório Palomar. A figura inferior mostra o espectro no infravermelho próximo obtido neste trabalho, onde se identificam componentes largas características de LINERs Tipo 1.

esquerda da mesma figura, a linha de He I é afetada pela presença da banda de absorção de CN, o que compromete a determinação das componentes largas tanto de He I quanto de Pa γ , dificultando a decomposição dessas linhas. Esses fatores combinados indicam que, para esta galáxia, a análise das linhas no NIR requer cautela, considerando tanto as limitações impostas pela qualidade dos dados quanto a complexidade dos processos físicos que moldam os perfis observados.

Os parâmetros (FWHM e velocidade do gás) das componentes largas ajustadas no NIR estão compilados na Tabela 4.1. Ressaltamos que, até onde verificamos, a detecção de linhas largas no NIR para NGC 4203 apresentada aqui é inédita na literatura, complementando as evidências ópticas prévias e oferecendo uma nova janela para o estudo da BLR neste objeto.

A galáxia apresenta ainda um ambiente gasoso complexo, com anéis de gás neutro em escalas de kpc e um anel molecular interno ($\sim 2 \times 10^7 M_{\odot}$) a menos de 300 pc do centro ([Yıldız *et al.*, 2015](#)). Contudo, devido à morfologia peculiar da linha H α , [Balmaverde e Capetti \(2014\)](#) mostraram que ajustes simples com três gaussianas não reproduzem adequadamente o perfil, sendo necessários modelos mais realistas (por exemplo, discos relativísticos ou gaussianas assimétricas; [Storchi-Bergmann *et al.* 2017](#)). Destacando a NGC 4203 como um dos LINERs Tipo 1 mais peculiares da amostra.

A população estelar do núcleo da galáxia foi estudada por [Sarzi *et al.* \(2005\)](#), que identificaram contribuições similares de populações jovens e antigas. Contudo, os autores sugerem que parte do contínuo pode ser atribuída ao próprio AGN, e não a estrelas jovens,

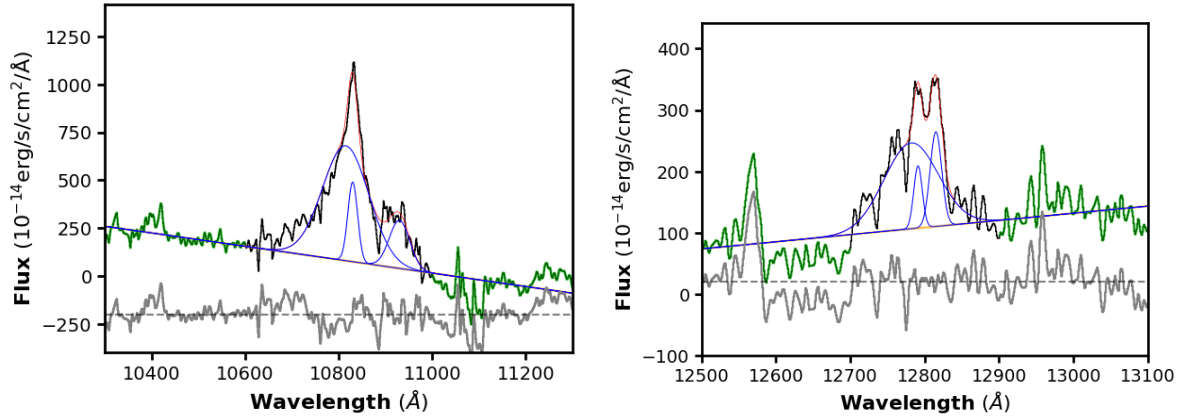


Figura 4.8: Ajustes multicomponentes de regiões espectrais da galáxia NGC 4203. Painel esquerdo: região com He I $1.083\mu\text{m}$ e Pa γ $1.094\mu\text{m}$. Painel direito: região com Pa β $1.282\mu\text{m}$. As cores, em ambos os painéis, estão representadas como na Fig. 4.2. Nota-se influência da banda de absorção de CN na borda da região de He I, que prejudica a decomposição de He I e Pa γ , e um perfil ruidoso e assimétrico em Pa β (com indícios de duplo pico). Fonte: Autora.

destacando a dificuldade de separar os componentes estelar e não estelar em LINERs fracos.

A SED de NGC 4203 é consistente com um regime de acreção radiativamente ineficiente, possivelmente associado a jatos relativísticos. Isso se evidencia pela ausência do *big blue bump* no ultravioleta e da re-emissão de poeira no infravermelho médio, características típicas de discos truncados ou de fluxos do tipo ADAF/RIAF. O núcleo compacto em rádio, com espectro quase plano ($\alpha \sim 0,1$) e fluxos de 6–10 mJy nas bandas centimétricas (correspondendo a luminosidades de $\sim 10^{27}\text{ergs}^{-1}\text{Hz}^{-1}$), reforça este cenário (Filho *et al.*, 2006). A emissão de raios X apresenta espectro de lei de potência sem uma linha de FeK α forte, enquanto a emissão óptica e UV permanece fraca, com alto valor de $\alpha_{\text{OX}} \sim -1.2$ (Terashima e Wilson 2002; Maoz 2007; Pian *et al.* 2010; Younes *et al.* 2011).

No infravermelho médio, a SED indica a ausência de um toro poeirento proeminente, como é típico em AGNs mais luminosos. A emissão é dominada por fontes estelares, por um fluxo RIAF interno ou, em menor grau, pelo jato — um padrão comum em LINERs com $L_{\text{bol}} \lesssim 10^{42}\text{ergs}^{-1}$ (Williams *et al.*, 2022). Já na banda de raios X, observa-se um núcleo pontual com luminosidade entre 10^{39} e 10^{40}ergs^{-1} (Iyomoto *et al.*, 1998), compatível com um AGN de baixa luminosidade e disco truncado. A massa do buraco negro central, estimada em $(6 \pm 1) \times 10^7 M_{\odot}$, resulta em razões de Eddington muito baixas ($L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} \sim 10^{-4}-10^{-6}$), como esperado para sistemas com acreção do tipo ADAF/RIAF (Shields *et al.*, 2000; Younes *et al.*, 2012).

A Figura 4.9 compara a SED da NGC 4203 à de uma Seyfert 1 (NGC 7469). Enquanto a NGC 4203 mostra um pico no infravermelho-óptico associado à emissão estelar, ela carece dos picos UV e IR médio típicos de Seyferts, como o da NGC 7469. Sua emissão

em rádio também é mais fraca, sugerindo a presença de um jato pouco energético. Esses dados reforçam sua natureza LINER: núcleo fraco, baixa taxa de acreção e ausência das estruturas usuais de AGNs luminosos.

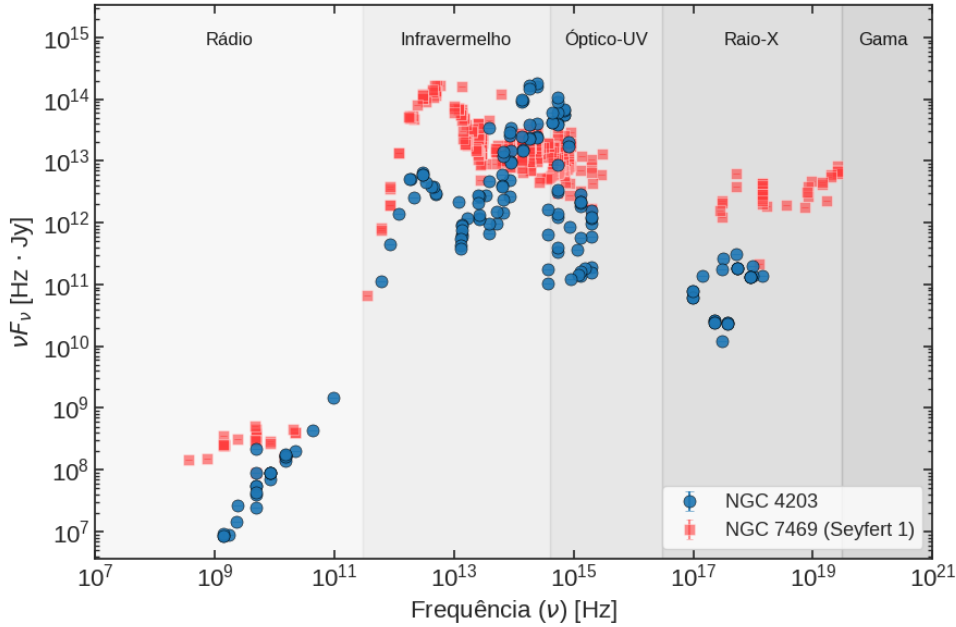


Figura 4.9: SED da galáxia NGC 4203 (círculos azuis), comparada com a SED da Seyfert 1 NGC 7469 (quadrados vermelhos). As diferentes regiões espectrais estão destacadas. A NGC 4203 exibe uma distribuição espectral típica de LINER, com fraca emissão no UV e infravermelho médio, e baixa luminosidade bolométrica, compatível com acreção ineficiente. Fonte: Autora.

• Galáxia NGC 4258

NGC 4258 (M 106) é uma galáxia espiral barrada do tipo SAB(s)bc, convencionalmente classificada como Seyfert 1 com base em espectroscopia óptica (Ho *et al.*, 1997). Abriga um buraco negro supermassivo de $\sim 4 \times 10^7 M_{\odot}$, cuja massa foi determinada com alta precisão graças ao disco de megamaser de H₂O em rotação Kepleriana, a $\sim 0,2$ pc do núcleo (Miyoshi *et al.*, 1995). A presença de um jato relativístico e de emissão em múltiplas faixas do espectro torna essa galáxia um laboratório ideal para o estudo de LLAGNs (Ho, 2008; Nemmen *et al.*, 2014).

O espectro óptico de NGC 4258 exibe linhas estreitas características de baixa ionização e um contínuo nuclear fraco. A linha H α larga é visível apenas em luz polarizada (FWHM ~ 1000 km/s, Wilkes *et al.* 1995), indicando uma BLR parcialmente obscurecida. A razão [O III]/H β ~ 10 posiciona o núcleo bem dentro da região Seyfert nos diagramas BPT, embora a presença de linhas de baixa ionização também remeta ao regime LINER (Maoz *et al.*, 2005). Esse comportamento ambíguo contribui para a classificação oscilante entre Seyfert 1 e LINER 1.

Quanto à presença de linhas largas da BLR em transições de Paschen/Brackett, a situação é mista: trabalhos de espectroscopia NIR revelam que $\text{Br } \gamma$ possui uma componente larga em NGC 4258 ($\text{FWHM}_{\text{broad}} \sim 1600 \text{ km s}^{-1}$) a partir de observações em *K-band* com espectroscopia integral Gemini/NIFS; (Menezes *et al.*, 2018), o que confirma a existência de emissão larga em comprimentos de onda NIR. Por outro lado, detecções claras e sistemáticas de linhas largas da série Paschen nesta galáxia não são abundantes na literatura; em muitos trabalhos anteriores a BLR foi investigada principalmente no óptico e no ultravioleta (incluindo detecções em luz polarizada), e as evidências NIR ainda eram limitadas antes dos estudos com instrumentos de última geração (Wilkes *et al.*, 1995).

Nas observações NIR deste trabalho, detectamos componentes largas nas linhas He I ($1.083 \mu\text{m}$), $\text{Pa}\beta$ ($1.282 \mu\text{m}$) e $\text{Pa}\gamma$ ($1.094 \mu\text{m}$), reforçando a presença de uma BLR. A linha $\text{Br}\gamma$ está muito fraca (quase indetectável), o que inviabiliza sua classificação via o diagrama Fe2H2 de Rodríguez-Ardila *et al.* (2004). Ainda assim, há fortes emissões de baixa ionização no NIR que, embora incertas, sugerem uma natureza LINER também nessa faixa espectral. O padrão de linhas NIR de NGC 4258 guarda semelhança com o observado em outros Seyferts com BLR obscurecida, indicando um caso híbrido.

A Figura 4.10 ilustra esse comportamento composto, apresentando o espectro óptico da galáxia (parte superior), obtido por Ho *et al.* (1997), e o espectro no infravermelho próximo (parte inferior), obtido neste trabalho. Nota-se o contínuo fraco no óptico e o surgimento claro de linhas largas no NIR, evidenciando a importância dessa faixa espectral para revelar a estrutura interna de LLAGNs parcialmente obscurecidos como NGC 4258.

A Figura 4.11 apresenta os ajustes espectrais das regiões contendo He I, $\text{Pa}\gamma$ e $\text{Pa}\beta$. Devido à elevada relação sinal-ruído do espectro, as medidas derivadas dos ajustes são relativamente robustas. No painel da esquerda, as linhas He I e $\text{Pa}\gamma$ apresentam múltiplos componentes, revelando perfis de emissão complexos que sugerem a presença de uma BLR. No painel da direita, a $\text{Pa}\beta$ exibe um perfil global bem representado por uma única componente larga, porém sua componente estreita apresenta estrutura de duplo pico. Esse comportamento sugere a presença de um possível cone de ionização ou de um outflow na NLR.

A observação de um perfil de duplo pico em linhas de hidrogênio no NIR é particularmente interessante, pois aponta para a possível presença de um disco de acreção em rotação ou de jatos bipolares na região do núcleo. Esses picos são formados quando o gás se move em alta velocidade em direções opostas em relação ao observador, criando um pico de emissão para o gás que se aproxima (desvio para o azul) e outro para o que se afasta (desvio para o vermelho). Ressaltamos, entretanto, que alternativas como superposição de múltiplos componentes não-keplerianos ou efeitos de absorção local também podem contribuir para a morfologia observada; os parâmetros cinemáticos extraídos desses ajustes (FWHM, deslocamento e dispersão) estão compilados na Tabela 4.1 e devem ser interpretados à luz dessas possíveis degenerescências.

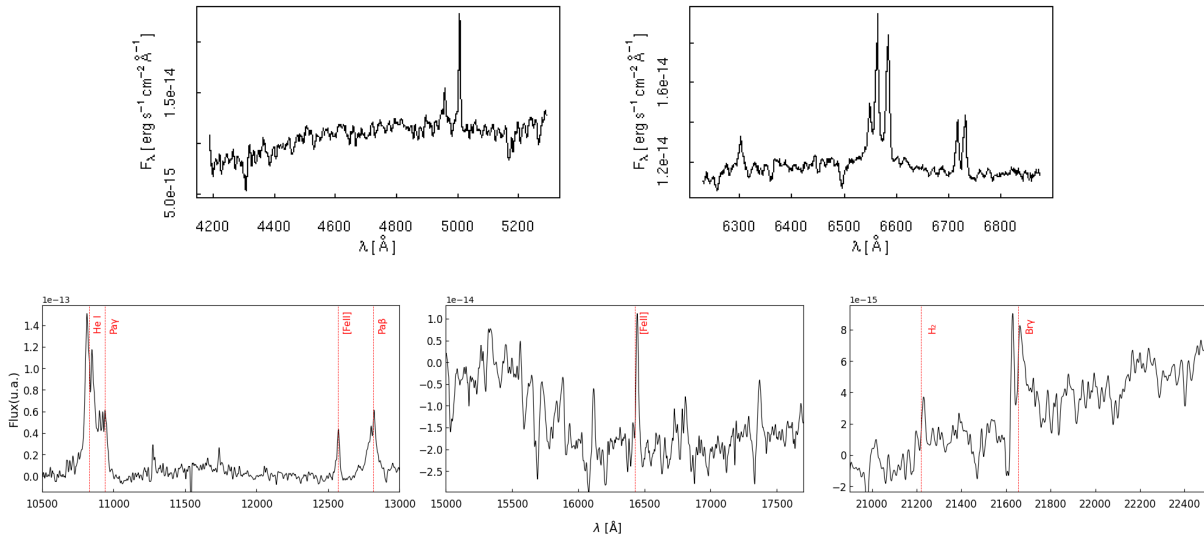


Figura 4.10: Espectros da galáxia NGC 4258. As duas figuras superiores mostram os espectros ópticos obtidos por [Ho et al. \(1997\)](#), como parte da amostra de núcleos ativos do levantamento Palomar. São visíveis linhas de emissão estreitas de baixa ionização, com indícios de uma componente larga em $H\alpha$ detectada apenas em luz polarizada. A imagem inferior apresenta o espectro no NIR, obtido neste trabalho, onde se destaca claramente uma componente larga em $Pa\beta$ ($1.282 \mu\text{m}$), evidenciando a presença de uma BLR parcialmente obscurecida no óptico. Esse contraste entre os espectros ressalta a importância da faixa NIR na identificação de estruturas internas em LLAGNs com extinção significativa, como NGC 4258.

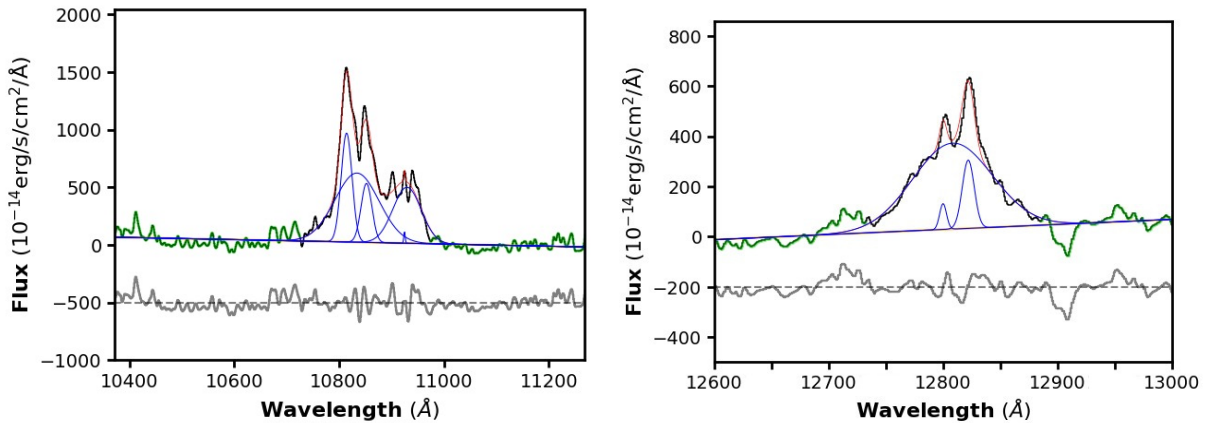


Figura 4.11: Ajustes espectrais das linhas He I, $Pa\gamma$ e $Pa\beta$ em NGC 4258. As cores, em ambos os painéis, seguem o mesmo esquema da Fig. 4.2. No painel esquerdo, as linhas He I e $Pa\gamma$ exibem múltiplos componentes, mas a emissão larga associada à BLR é bem descrita por uma única gaussiana. No painel direito, a linha $Pa\beta$ apresenta componente larga simples, enquanto sua componente estreita exhibe perfil de duplo pico. Fonte: Autora

A SED da galáxia NGC 4258, cobrindo do rádio aos raios X, revela um núcleo de baixa luminosidade e baixo rendimento radiativo. A emissão em rádio é dominada pelo jato relativístico, enquanto o disco de masers fornece uma medida precisa da massa do

buraco negro central (Herrnstein, 1999; Masini *et al.*, 2022). No infravermelho observa-se emissão térmica de poeira e linhas moleculares, mas não há evidência do *big blue bump*, típico de Seyferts clássicas. O espectro de raios X mostra um contínuo moderadamente duro ($\Gamma \sim 1,8$) e uma baixa luminosidade bolométrica da ordem de 10^{41} – 10^{42} erg s $^{-1}$, com $L/L_{\text{Edd}} \sim 10^{-4}$ (e.g., Masini *et al.*, 2022; Trzeźniewski *et al.*, 2011; Wilson *et al.*, 2001). Essas características são típicas de LLAGNs, sugerindo um regime de acreção ineficiente, possivelmente dominado por um ADAF ou por um disco truncado com jato associado (Lasota *et al.*, 1996; Nemmen *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2002).

Adicionalmente, Barth *et al.* (1999) mostraram que, em luz polarizada, não apenas as linhas largas de Balmer, mas também várias linhas proibidas se apresentam alargadas, com larguras correlacionadas à densidade crítica da transição. Esse comportamento pode estar relacionado à interação entre o jato e a região de linhas estreitas, indicando uma estrutura nuclear mais complexa do que a simples presença de uma BLR oculta.

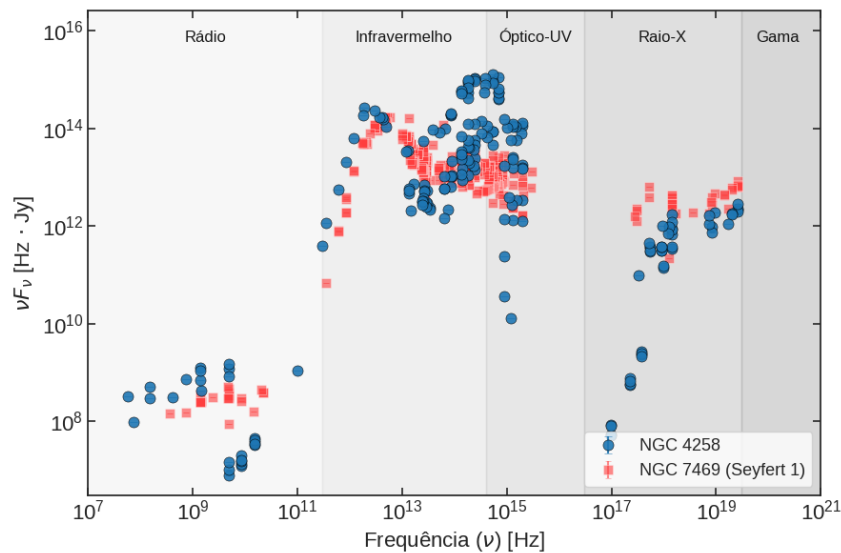


Figura 4.12: SED da galáxia NGC 4258 (em azul), comparada com a SED da Seyfert Tipo 1 NGC 7469 (em vermelho). Os dados abrangem desde o rádio até os raios X, e evidenciam a ausência de um pico térmico no ultravioleta em NGC 4258, típico de LLAGNs. Em contraste, NGC 7469 exibe uma emissão proeminente nessa região, associada ao disco de acreção padrão em AGNs de alta luminosidade. A SED de NGC 4258 também apresenta emissão mais fraca no infravermelho e uma queda acentuada no UV, reforçando a interpretação de um regime de acreção truncada ou obscurecido. Fonte: Autora.

Em resumo, NGC 4258 exibe propriedades intermediárias entre Seyferts e LINERs. A presença de linhas largas no NIR e em polarização confirma a existência de uma BLR parcialmente obscurecida. Por outro lado, sua baixa luminosidade bolométrica, espectro de raios X e a ausência de picos no UV o aproximam dos LLAGNs. Essa dualidade evidencia a dificuldade de classificação: trata-se de um AGN fraco, possivelmente em regime de acreção truncada, com sinais de atividade nuclear típica de Seyferts, mas também com características estruturais e energéticas compatíveis com LINERs clássicos (Ho, 2008). A

Figura 4.12 ilustra esse comportamento, comparando a SED da NGC 4258 com a de uma Seyfert Tipo 1 (NGC 7469).

Um estudo recente com dados do SITELLE² revelou que os jatos de NGC 4258 interagem fortemente com o meio interestelar, especialmente nas chamadas “braçadeiras anômalas”, que apresentam altas dispersões de velocidade (200 – 250 km s⁻¹) e evidências de choques e compressão de gás. Essas interações ocorrem em escalas de até 6 kpc e parecem afetar tanto a ionização quanto a formação estelar. Os resultados reforçam que jatos de baixa potência em LLAGNs podem impactar significativamente o ambiente galáctico. A detecção de linhas largas no NIR e a SED observada são consistentes com esse cenário de retroalimentação e acreção ineficiente (Fernández-Arenas *et al.*, 2025).

• Galáxia NGC 4450

A NGC 4450 é uma galáxia pertencente ao aglomerado de Virgo. Seu espectro óptico (painel superior da Figura 4.13), obtido pelo levantamento de Palomar (Ho *et al.*, 1997), apresenta intensas linhas de baixa ionização e um componente largo de H α (6563Å) com FWHM \sim 2300 km/s. Observações do HST confirmaram a presença de um perfil de duplo pico nessa linha, indicativo de emissão proveniente de um disco de acreção relativístico (Ho *et al.* 2000; Shields *et al.* 2000; Barth *et al.* 2001). Essa assinatura é suficiente para classificá-la como LINER 1, mesmo na ausência de H β (4861Å) largo. Até o momento, não há registros na literatura de detecção da BLR dessa galáxia no NIR, tornando este trabalho o primeiro a explorar essa característica neste objeto.

O espectro no NIR obtido neste trabalho (painel inferior da Figura 4.13) revela componentes largas nas linhas He I 1.083 μ m, Pa γ 1.094 μ m e Pa β 1.282 μ m, indicando a presença de uma BLR fraca, porém ativa. Diferentemente da H α , não se observa um perfil de duplo pico claro nessas transições. No entanto, essa ausência pode estar relacionada a limitações observacionais: no caso de He I e Pa γ , a pequena separação em comprimento de onda resulta em perfis fortemente sobrepostos, dificultando a identificação de estruturas cinemáticas distintas. Já a Pa β , embora mais isolada, está próxima da borda da banda J, onde o S/N é reduzido e efeitos instrumentais se tornam mais relevantes. Estudos anteriores associam diferenças morfológicas entre linhas ópticas e NIR à estratificação física e dinâmica da BLR, com as linhas NIR sendo formadas em regiões mais externas ou menos obscurecidas (e.g., Ricci *et al.* 2022; Kuhn *et al.* 2024); entretanto, no presente caso, as condições dos dados não permitem confirmar essa interpretação de forma conclusiva.

Para investigar mais detalhadamente a emissão da linha de He I, foi realizado um ajuste multicomponente, incluindo perfis largos associados à BLR (Figura 4.14). O resultado evidencia a presença de uma componente larga, apesar de um contínuo mal definido — possivelmente devido à baixa relação sinal-ruído e à complexidade do espectro nessa região. Esse procedimento pôde ser aplicado apenas à linha de He I, sendo inviável obter

²Para mais informações acessar: <https://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Sitelle/>.

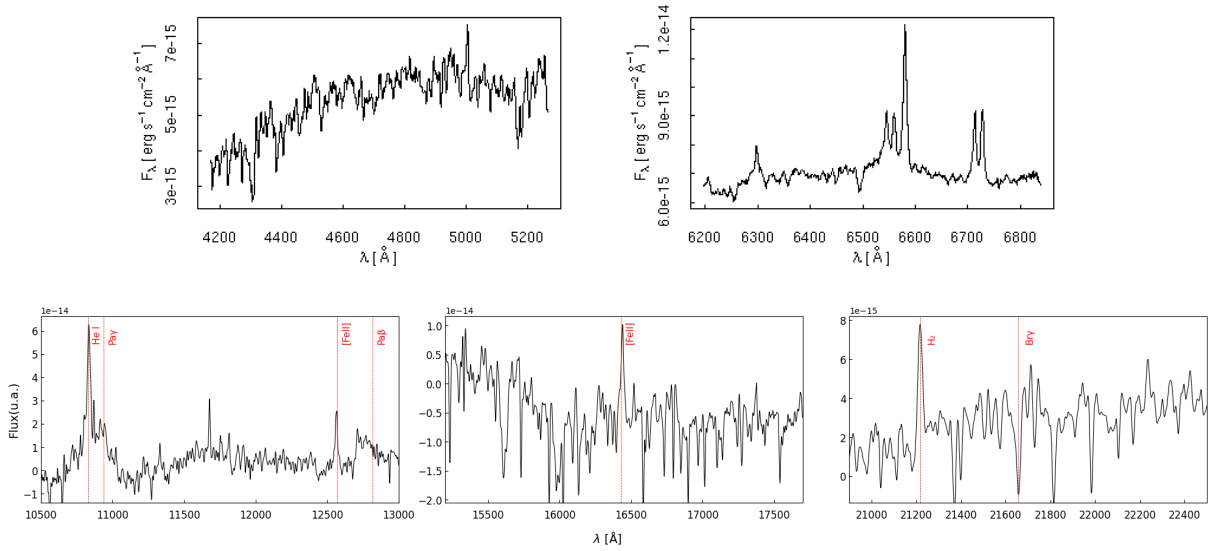


Figura 4.13: Espectros da galáxia NGC 4450. As figuras superiores mostram os espectros ópticos de [Ho et al. \(1997\)](#), com destaque para o perfil duplo-peaked em $H\alpha$. A figura inferior exibe o espectro NIR deste trabalho, com as linhas He I e $Pa\gamma$ apresentando perfis monomodais, típicos de regiões externas da BLR.

ajustes confiáveis para as regiões de $Pa\gamma$ e $Pa\beta$. Mesmo para a He I, a qualidade dos dados compromete a precisão da decomposição, agravada pela presença da banda de absorção de CN no lado direito da linha, que interfere diretamente na determinação de suas componentes largas.

Os parâmetros obtidos para essa componente larga foram utilizados para estimar a velocidade do gás na BLR, cujos valores estão apresentados na Tabela 4.1. Esses fatores combinados indicam que a análise quantitativa das linhas no infravermelho próximo deve ser conduzida com cautela, considerando tanto as limitações impostas pelo ruído quanto os efeitos de absorção de bandas adjacentes.

A SED da NGC 4450 fornece uma visão complementar da natureza de seu núcleo. Observa-se um déficit acentuado de emissão no ultravioleta e no infravermelho, com ausência tanto do *big blue bump* quanto de um pico IR associado a um toro quente. Essa morfologia é típica de AGNs com baixa taxa de acreção e sugere a presença de um fluxo de acreção ineficiente, do tipo ADAF/RIAF ([Mason et al., 2012](#); [Nemmen et al., 2014](#)). O contínuo no infravermelho é relativamente plano ([González-Martín et al., 2015](#)), enquanto a emissão em rádio, embora fraca, está concentrada em um núcleo compacto com espectro plano, sugerindo a presença de um jato colimado ([Ho, 2008](#); [Nagar et al., 2002](#)). Em raios X, o espectro é suave, bem ajustado por uma lei de potência com índice espectral $\Gamma \sim 2.0$, sem evidência de linha Fe $K\alpha$ proeminente — o que reforça a ausência de um toro espesso ([González-Martín et al., 2009](#); [Younes et al., 2011](#)). A Figura 4.15 mostra a SED da NGC 4450 em comparação com a de uma Seyfert 1 típica (NGC 7469). Observa-se

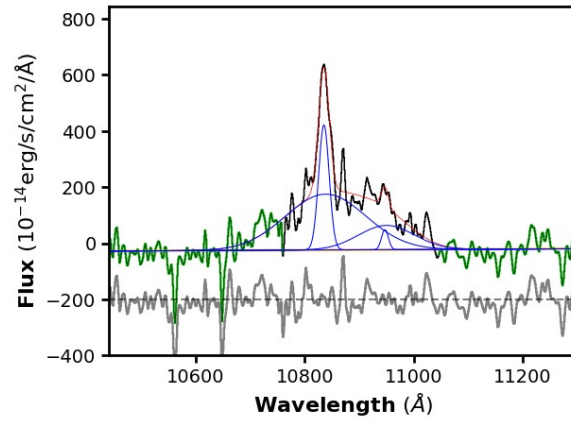


Figura 4.14: Ajuste multicomponente da linha He I em NGC 4450, revelando componente larga associada à BLR. As cores estão representadas como na Fig. 4.2. A baixa relação sinal-ruído e a absorção da banda de CN limitam a precisão do ajuste. Fonte: Autora.

que a NGC 4450 apresenta o mesmo comportamento identificado para as demais fontes desta amostra: ausência de emissão térmica intensa e predominância de processos não térmicos, compatíveis com um regime de acreção ineficiente característico de LINERs de baixa luminosidade. Dessa forma, NGC4450 constitui um caso representativo de LINER 1 com BLR tênue e núcleo rádio-loud compacto.

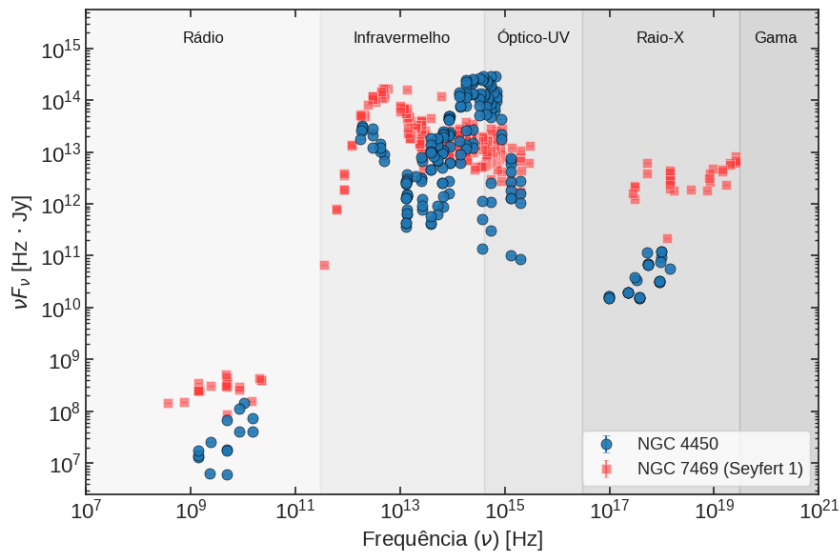


Figura 4.15: SED da galáxia NGC 4450 (círculos azuis), comparada com a SED da Seyfert 1 NGC 7469 (quadrados vermelhos). A ausência do *big blue bump* e do pico IR quente em NGC 4450 indica um regime de acreção ineficiente, característico de LINERs. Fonte: Autora.

• Galáxia NGC 3031

A galáxia NGC 3031 (M 81) é tipicamente classificada como um AGN de baixo brilho, situada na transição entre LINER e Seyfert 1. Estudos espectroscópicos ópticos revelam razões de linha compatíveis com LINERs, mas também a presença de componentes

largas em linhas de recombinação, como $H\alpha$ (6563Å), $H\beta$ (4861Å) e $H\gamma$ (4340Å) (Ho *et al.*, 1997). Em especial, a linha $H\alpha$ exibe um componente de base largo com FWHM ~ 2650 km/s, levando os autores a adotar uma classificação híbrida “LINER/S1.5”, refletindo a coexistência de uma BLR fraca com características típicas de Seyfert 1.

O espectro NIR, obtido neste trabalho, reforça essa interpretação. Componentes largos também são detectados nas linhas $He I$ (1.083 μm), $Pa\gamma$ (1.094 μm) e $Pa\beta$ (1.282 μm), corroborando a presença de uma BLR. A Figura 4.16 apresenta os espectros ópticos e NIR, ilustrando a estrutura das linhas de emissão e sua origem em diferentes regiões da BLR.

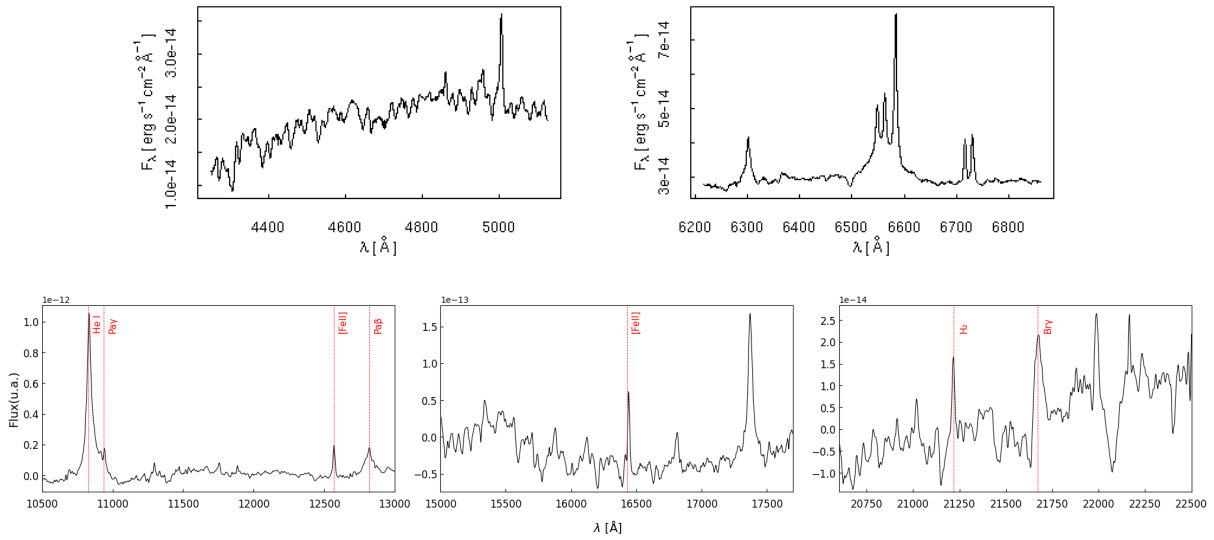


Figura 4.16: Espectros da galáxia NGC 3031. As figuras superiores mostram os espectros ópticos de Ho *et al.* (1997). A figura inferior exibe o espectro NIR deste trabalho, onde se observam as linhas ($Pa\beta$, $Pa\gamma$ e $He I$) com componentes largas típicas da BLR. Fonte: Autora.

Nos painéis da Figura 4.17, apresentamos o ajuste espectral das linhas $He I$, $Pa\gamma$ e $Pa\beta$. No primeiro painel, a linha $Pa\gamma$ encontra-se fortemente contaminada pela emissão de $He I$ e pela presença da banda CN, que absorve parcialmente a componente larga. Como as SSPs utilizadas na síntese não representam adequadamente essa banda, a linha não pôde ser medida de forma confiável. No segundo painel, apesar do ruído presente no contínuo, é possível identificar claramente a presença de uma componente larga na linha $Pa\beta$, evidenciando a atuação de uma BLR fraca, mas ativa. Os parâmetros (FWHM e velocidade do gás) medidos estão apresentados na Tabela 4.1.

A SED nuclear da NGC 3031 revela um núcleo ativo com emissão significativa em múltiplas faixas do espectro. Diferente do que se espera para LLAGNs fortemente dominados por raios X, observa-se um pico pronunciado no óptico/UV (em torno de $\nu \sim 10^{15}$ Hz), possivelmente associado à emissão térmica do disco de acreção. No infravermelho, há um segundo pico proeminente, compatível com a emissão de poeira aquecida no toro cir-

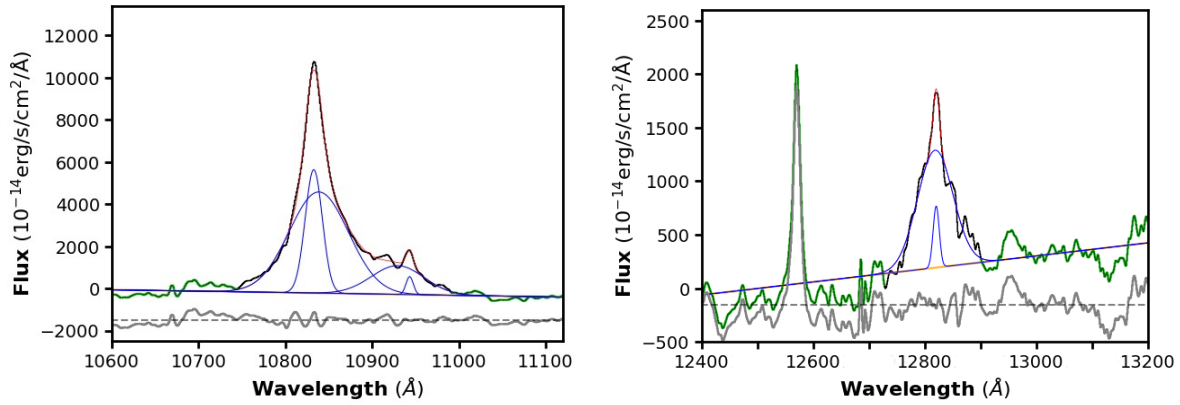


Figura 4.17: Ajustes das linhas He I, Pa γ e Pa β em NGC 3031. As cores, em ambos os painéis, estão representadas como na Fig. 4.2. As medições do painel esquerdo são comprometidas pela contaminação da banda CN. Em contrapartida, a componente larga visível na linha Pa β (painel direito) fornece evidência clara de uma BLR fraca. Fonte: Autora.

cumnuclear. A emissão em raios X (2–10 keV) apresenta intensidade e forma espectral semelhantes às da galáxia Seyfert 1 NGC 7469, com espectro descrito por uma lei de potência suave ($\Gamma \sim 2.0\text{--}2.2$) e variações moderadas. Esses elementos sugerem que, embora a NGC 3031 opere em regime de baixa luminosidade ($L_{\text{bol}} \sim 2 \times 10^{41}$ erg/s; [Nemmen et al. 2011](#)), sua estrutura nuclear mantém características de AGNs mais radiativamente eficientes.

No domínio rádio, a NGC 3031 apresenta um núcleo compacto detectável por VLBI, sendo relativamente *radio-loud* para um LINER ([Ho, 2008](#)). Essa característica é comum em LLAGNs, cujas SEDs são marcadas por emissão rádio proeminente em comparação a AGNs mais luminosos.

No infravermelho próximo, a emissão é dominada por luz estelar, sem indícios de um pico nuclear associado a poeira quente ([Grossan et al., 2001](#)). Já no infravermelho médio, destaca-se um proeminente pico de silicato entre 8–10 μm , com aumento abrupto no fluxo ([Smith et al., 2010](#)) — um comportamento que contrasta com o *bump* IR suave típico de Seyferts, geralmente associado ao toro quente. No óptico e ultravioleta próximo, a emissão também é estelar, proveniente majoritariamente do bulbo galáctico. Não há sinal do *big blue bump*, que caracteriza a emissão térmica de discos de acreção em Seyferts mais ativos ([Ho 1999](#); [Grossan et al. 2001](#)).

A Figura 4.18 compara a SED da NGC 3031 com a de uma Seyfert 1 clássica, a NGC 7469. Nota-se que, apesar de ambas abrigarem BLRs, a NGC 3031 exhibe ausência dos principais componentes térmicos — como o *big blue bump* e o pico infravermelho — típicos de Seyferts. Sua SED, quando normalizada ao fluxo em raios X, lembra vagamente a de um quasar *radio-loud*, mas em menor escala de luminosidade. Essa configuração é coerente com um núcleo ativo de baixa eficiência radiativa, dominado por emissão não térmica.

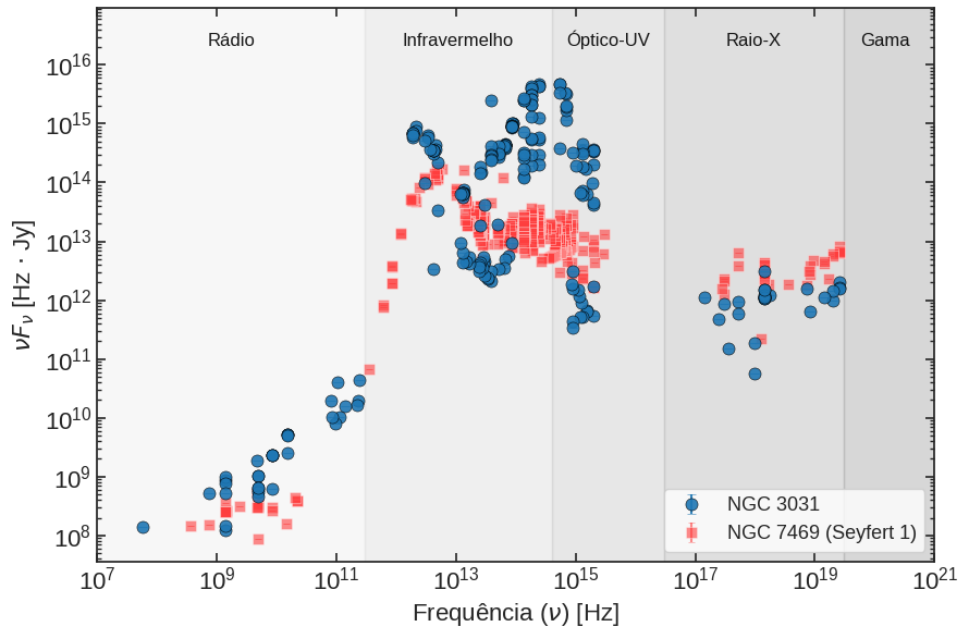


Figura 4.18: SED da galáxia NGC 3031 (círculos azuis), comparada com a SED da Seyfert 1 NGC 7469 (quadrados vermelhos). A NGC 3031 exibe características típicas de LINERs: ausência do *big blue bump*, emissão fraca no infravermelho e concentração de energia nos raios X. Fonte: Autora.

4.3 Velocidade do gás na BLR

Outro resultado interessante em relação aos objetos da amostra está associado à velocidade do gás nas regiões nucleares, estimada a partir da largura das linhas de emissão largas nos espectros NIR. Para essas linhas (originadas na BLR) a medida da largura total a meia altura (o FWHM) permite inferir a dispersão de velocidades do gás em órbita ao redor do buraco negro central. Como o alargamento dessas linhas é causado pelo efeito Doppler associado a esses movimentos orbitais, é possível converter o FWHM (em \AA) para velocidade (em km/s) pela relação:

$$v = \frac{\text{FWHM}_\lambda}{\lambda_0} c \quad (4.1)$$

onde λ_0 , é o comprimento de onda central da linha (em \AA), FWHM_λ é a largura da linha também em \AA , e c é a velocidade da luz ($\sim 3 \times 10^5 \text{ km/s}$). Essa abordagem assume que o alargamento é dominado pelo movimento Doppler do gás, como esperado para as linhas emitidas na BLR.

As larguras foram medidas com a biblioteca `Pyspeckit` (Ginsburg e Mirocha, 2011), a partir do ajuste de perfis gaussianos às componentes largas das linhas He I $1.083 \mu\text{m}$ Pa γ $1.094 \mu\text{m}$ e Pa β $1.282 \mu\text{m}$ (ver Seção 2.4). A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos, com velocidades que variam entre aproximadamente 1000 e 5300 km/s, compatíveis com

os valores esperados para a BLR de AGNs (e.g., Landt *et al.*, 2008; Riffel *et al.*, 2013a).

Tabela 4.1: FWHM e velocidades para linhas largas.

Objeto	He I		Pa γ		Pa β	
	FWHM	v (km/s)	FWHM	v (km/s)	FWHM	v (km/s)
NGC 1052	118.79	3290.5	–	–	45.69	1069.4
NGC 3998	189.28	5243.2	–	–	84.64	1981.0
NGC 4203	156.60	4338.0	54.05	1482.2	72.17	1689.1
NGC 4258	100.55	2785.2	58.54	1605.2	80.85	1892.4
NGC 4450	173.20	4797.9	–	–	–	–
NGC 3031	82.14	2275.4	–	–	74.93	1753.3

Nota. Valores apresentados correspondem a FWHM já corrigido por valor intrínseco.

Alguns resultados específicos merecem destaque. As galáxias NGC 3998 e NGC 4450 apresentam velocidades elevadas para a linha de He I, com valores de $v \gtrsim 4800$ – 5200 km/s. Tais valores são compatíveis com as velocidades observadas nas linhas do visível em objetos Seyfert de Tipo I clássicos. Em contraste, NGC 3031 apresenta velocidades significativamente menores, da ordem de 1000 km/s. Outro ponto importante é a consistência entre as diferentes linhas NIR. Nos objetos com múltiplas detecções (como NGC 4203, NGC 4258 e NGC 3031), as velocidades derivadas de Pa γ (1.094 μm) e Pa β (1.282 μm) são compatíveis entre si, mesmo com diferenças de sensibilidade e sinal-ruído entre as linhas. Isso reforça a robustez das medidas e a confiabilidade do método.

Ressaltamos que as medidas listadas na Tabela 4.1 devem ser interpretadas com cautela, uma vez que efeitos observacionais — baixo S/N em regiões próximas à borda da banda, contaminação por bandas moleculares (CN) e escolhas na modelagem do contínuo — podem influenciar os valores finais. As FWHM apresentadas foram corrigidas pela resolução instrumental antes da conversão para velocidade. Em particular, o uso do NIR é vantajoso em objetos com extinção nuclear, pois reduz a atenuação por poeira; por outro lado, diferenças entre medidas NIR e ópticas podem refletir estratificação da BLR e efeitos geométricos (Landt *et al.*, 2008; Rodríguez-Ardila *et al.*, 2005).

A análise feita neste capítulo confirma, de maneira homogênea para a amostra, que todos os objetos apresentam evidências de BLR já reportadas na literatura; o principal avanço deste trabalho é a detecção e quantificação sistemática dessas componentes largas no domínio NIR para a maioria das fontes da amostra. Em nossos espectros a linha He I (1.083 μm) mostra-se particularmente proeminente e, em geral, é a transição NIR na qual a BLR é detectada com maior facilidade; por outro lado, linhas de baixa ionização como [S III] aparecem relativamente fracas comparadas ao comportamento observado em Seyfert 1 clássicos, que tipicamente apresentam múltiplas linhas largas bem marcadas.

Salvo exceções já relatadas na literatura (por exemplo, evidências prévias de componente ampla em $\text{Br}\gamma$ para NGC 4258), este trabalho traz, para a maior parte da amostra, as primeiras medidas cinemáticas da BLR no NIR — os valores extraídos dos ajustes gaussianos estão compilados na Tabela 4.1. Esses resultados complementam as detecções ópticas, demonstrando a utilidade do NIR para revelar BLRs parcialmente obscurecidos e fornecendo estimativas de velocidade independentes da atenuação por poeira.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

Este trabalho teve como principal objetivo investigar a posição ocupada por núcleos galácticos de baixa ionização (LINERs) em diagramas diagnósticos no infravermelho próximo, verificando se esses objetos se distribuem de maneira distinta em relação a AGN tradicionais. Para isso, utilizamos uma amostra de galáxias ativas baseada em [Mason *et al.* \(2015\)](#), medindo razões de linhas de emissão, construindo diagramas diagnósticos e avaliando o efeito do avermelhamento interestelar.

A classificação das LINERs nesta amostra foi realizada com base no diagrama de diagnóstico Fe2H2 proposto por [Rodríguez-Ardila *et al.* \(2004\)](#), que utiliza as razões $[\text{Fe II}] 1.257 \mu\text{m}/\text{Pa}\beta$ e $\text{H}_2 2.1218 \mu\text{m}/\text{Br}\gamma$. Essa abordagem permitiu identificar, de forma empírica, quais galáxias apresentam características espectrais compatíveis com regiões de baixa ionização. A aplicação desse critério à amostra de [Mason *et al.* \(2015\)](#) revelou que, entre os objetos para os quais foi possível medir essas quatro linhas, cerca de 53% dos objetos analisados (que foram possíveis de medir essas linhas) apresentam valores elevados para ambas as razões de linha, posicionando-se na região característica dos LINERs no diagrama. Esse resultado ressalta a predominância de núcleos de baixa ionização na amostra, em consonância com a definição clássica desses objetos como fontes dominadas por linhas de emissão estreitas e de baixa excitação ([Heckman, 1980](#)).

Um aspecto relevante é a reclassificação de quatro galáxias (NGC 4579, NGC 1167, NGC 3079 e NGC 5194), previamente classificadas como Seyfert na literatura, que foram posicionadas na região de LINERs a partir de seus espectros no infravermelho próximo. Isso sugere que os diagnósticos no NIR podem capturar propriedades físicas que permanecem ocultas em outras faixas espectrais, como o óptico. Portanto, esse resultado destaca o papel do NIR como ferramenta poderosa para refinar classificações espectrais e revelar a verdadeira natureza de AGNs com características ambíguas ou intermediárias.

As galáxias classificadas como LINERs a partir do diagrama Fe2H2 foram então posicionadas nos diagramas diagnósticos propostos por [Calabrò *et al.* \(2023\)](#), que exploram combinações de razões como $[\text{Fe II}]/\text{Pa}\beta$, $[\text{C I}]/\text{Pa}\beta$ e $[\text{S III}]/\text{Pa}\gamma$. Observamos que essas fontes tendem a se concentrar em regiões específicas desses planos, revelando condições

físicas diferentes. Com base nessa distribuição, propusemos uma separação visual empírica entre LINERs e demais fontes, representada por uma linha tracejada. Embora essa separação careça de fundamentação teórica robusta neste estágio, ela se mostrou eficaz em destacar a posição típica dos LINERs e pode atuar como critério auxiliar em contextos onde razões envolvendo H_2 não estão disponíveis. Os baixos valores observados para as razões de linha nesses objetos reforçam a interpretação de que a excitação do gás é dominada por fotoionização – provavelmente associada à radiação não térmica de um AGN fraco.

Como parte da análise, realizamos uma comparação entre dois métodos de estimativa do avermelhamento no infravermelho próximo, utilizando as razões de linha $Pa\beta/Br\gamma$ e $[Fe\ II] 1.257\mu m / 1.644\mu m$. Observamos que, para a amostra (composta majoritariamente por objetos compatíveis com a classificação de LINERs e alguns AGN típicos), os valores de $E(B - V)$ obtidos com linhas de recombinação tendem a ser sistematicamente mais altos, enquanto aqueles derivados das linhas proibidas de Fe^+ apresentam maior dispersão. Esse resultado sugere que as duas abordagens traçam regiões fisicamente distintas do meio interestelar. Enquanto as linhas de hidrogênio são associadas a regiões H II mais internas e intensamente ionizadas, as linhas de $[Fe\ II]$ provêm de zonas parcialmente ionizadas ou regiões de choque, possivelmente mais externas ou menos obscurecidas.

Essa distinção é ilustrada, por exemplo, por NGC 3079, que apresenta alta extinção segundo $Pa\beta/Br\gamma$ e um valor muito menor via $[Fe\ II]$, sugerindo que o gás de baixa ionização se encontra fora das regiões mais empoeiradas. Em contrapartida, galáxias como NGC 2273 e NGC 4388 exibiram concordância notável entre os métodos, reforçando a ideia de ambientes mais homogêneos e densamente obscurecidos. Em conjunto, esses resultados revelam que a utilização combinada dessas razões de linha permite não apenas estimar a extinção, mas também inferir aspectos da estrutura espacial do gás nos núcleos ativos. Essa abordagem reforça o potencial do infravermelho próximo como ferramenta sensível para sondar a distribuição de poeira e a complexidade física dos AGNs.

A partir disso, também foi realizada uma análise da razão $[Fe\ II] 1.257 / 1.644\mu m$, frequentemente usada como estimador da extinção diferencial no NIR. A média observada para essa razão em nossa amostra foi de aproximadamente 1.12, valor inferior ao esperado teoricamente (1.34), mas superior à média de 0.98 reportada por [Rodríguez-Ardila et al. \(2004\)](#) para uma amostra distinta de AGNs. Essa diferença de cerca de 16.4% sugere a presença de extinção moderada nas regiões emissoras de $[Fe,II]$, embora também possa refletir incertezas nos parâmetros atômicos das transições envolvidas. A dispersão dos valores observados reforça a complexidade das condições físicas do gás nessas galáxias, com possíveis variações locais na densidade, geometria e grau de obscurecimento.

Outro resultado relevante deste trabalho foi a identificação de uma fração significativa de LINERs Tipo 1 em nossa amostra, evidenciada pela presença de componentes largas nas linhas de He I, $Pa\beta$ e $Pa\gamma$. Essa característica apoia a interpretação de LINERs

como AGNs de baixa luminosidade, o que é consistente com os modelos de unificação. A detecção dessas linhas largas implica que uma BLR existe mesmo em fontes com baixa taxa de acreção, o que é compatível com modelos como o de acreção radiativamente ineficiente (RIAF/ADAF). Nesse contexto, a principal contribuição metodológica foi a detecção e quantificação sistemática dessas componentes largas no NIR, utilizando a linha He I como um indicador proeminente. Essa abordagem trouxe as primeiras medidas cinemáticas da BLR no NIR para a maioria das fontes, demonstrando a eficácia desse comprimento de onda na revelação de BLRs que estão obscurecidas por poeira, complementando assim as observações ópticas.

Dessa forma, os resultados obtidos ao longo deste trabalho permitiram responder às questões centrais propostas na introdução (na subseção 1.3). **(1)** Foi possível identificar que os mecanismos dominantes de excitação nas fontes analisadas são consistentes com a atuação de AGNs fracos, cuja radiação não térmica é responsável pela ionização do gás, em contraste com os altos valores previstos por modelos de choque. **(2)** A análise no infravermelho próximo também se mostrou eficaz para reclassificar núcleos previamente catalogados como Seyfert, revelando que mais de metade da amostra é mais compatível com LINERs — evidência clara do poder do NIR para refinar classificações espectrais em ambientes obscurecidos. **(3)** Além disso, a discrepância entre os valores de extinção obtidos pelas linhas de hidrogênio e de [Fe II] sugere a coexistência de diferentes regiões emissores dentro de uma mesma galáxia, o que aponta para a contribuição simultânea de múltiplos processos físicos, ainda que em diferentes escalas espaciais. **(4)** Por fim, a distribuição dos objetos nos diagramas de diagnósticos revelou uma boa coerência com expectativas teóricas, especialmente para casos de excitação por AGNs de baixa luminosidade, reforçando a utilidade desses planos como ferramenta diagnóstica complementar em estudos de galáxias ativas. Com isso, este trabalho contribui para o avanço na caracterização física de LINERs e destaca o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo como via promissora para a investigação de núcleos galácticos obscurecidos.

Como extensão deste estudo, uma etapa futura envolve a ampliação da amostra analisada, de forma a incluir todo o conjunto de objetos catalogados por [Ho *et al.* \(1997\)](#), permitindo uma caracterização mais abrangente da população de LINERs no NIR. Para isso, planeja-se a solicitação de tempo de observação nos telescópios Gemini e SOAR, de modo a obter espectros NIR para todos os alvos da amostra, possibilitando uma análise estatisticamente mais robusta e a comparação direta com modelos teóricos de diferentes mecanismos de excitação. Adicionalmente, será realizada uma investigação dedicada da linha de He I $1.083 \mu\text{m}$: esta transição, por envolver o nível metaestável 2^3S , é menos afetada pela atenuação por poeira do que as linhas ópticas e pode ser fortemente realimentada por excitação colisional e por choques em regiões de alta densidade ou em zonas de interação jato-meio.

Referências Bibliográficas

- Alexander, D. M., Hickox, R. C., Aird, J., et al., 2025, “What drives the growth of black holes: a decade of progress”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:2506.19166. doi: 10.48550/arXiv.2506.19166.
- Alonso-Herrero, A., García-Burillo, S., Hönig, S. F., et al., 2021, “The Galaxy Activity, Torus, and Outflow Survey (GATOS). II. Torus and polar dust emission in nearby Seyfert galaxies”, *Astron. Astrophys.*, 652:A99. doi: 10.1051/0004-6361/202141219.
- Antonucci, R. R. J., Miller, J. S., 1985, “Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068.” *Astrophys. J.*, v. 297 (out.), pp. 621–632. doi: 10.1086/163559.
- Antonucci, R., 1993, “Unified models for active galactic nuclei and quasars.” *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 31 (jan.), pp. 473–521. doi: 10.1146/annurev.aa.31.090193.002353.
- Asmus, D., 2019, “New evidence for the ubiquity of prominent polar dust emission in AGN on tens of parsec scales”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 489, n. 2 (out.), pp. 2177–2188. doi: 10.1093/mnras/stz2289.
- Asmus, D., Hönig, S. F., Gandhi, P., 2016, “The Subarcsecond Mid-infrared View of Local Active Galactic Nuclei. III. Polar Dust Emission”, *Astrophys. J.*, 822(2): 109. doi: 10.3847/0004-637X/822/2/109.
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., Terlevich, R., 1981, “Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects.” *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 93 (fev.), pp. 5–19. doi: 10.1086/130766.
- Balmaverde, B., Capetti, A., 2014, “The HST view of the broad line region in low luminosity AGN”, *Astronomy amp; Astrophysics*, v. 563 (mar.), pp. A119. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361/201321989. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321989>>.
- Bamford, S. P., Rojas, A. L., Nichol, R. C., et al., 2008, “Revealing components of the galaxy population through non-parametric techniques”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 391, n. 2 (dez.), pp. 607–616. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13963.x.

- Barth, A. J., Shields, J. C., 2000, “LINER/HII “Transition” Nuclei and the Nature of NGC 4569”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 112, n. 772 (jun.), pp. 753–767. doi: 10.1086/316583.
- Barth, A. J., Filippenko, A. V., Moran, E. C., 1999, “Polarized Broad H α Emission from the LINER Nucleus of NGC 1052”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 515, n. 2 (abr.), pp. L61–L64. doi: 10.1086/311976.
- Barth, A. J., Ho, L. C., Filippenko, A. V., et al., 2001, “The Broad-Line and Narrow-Line Regions of the LINER NGC 4579”, *Astrophys. J.*, v. 546, n. 1 (jan.), pp. 205–209. doi: 10.1086/318268.
- Bautista, M. A., Pradhan, A. K., 1998, “Ionization Structure and Spectra of Iron in Gaseous Nebulae”, *Astrophys. J.*, v. 492, n. 2 (jan.), pp. 650–676. doi: 10.1086/305061.
- Beckmann, V., Shrader, C. R., 2012, *Active Galactic Nuclei*.
- Bentz, M. C., Peterson, B. M., Netzer, H., et al., 2009, “THE RADIUS–LUMINOSITY RELATIONSHIP FOR ACTIVE GALACTIC NUCLEI: THE EFFECT OF HOST-GALAXY STARLIGHT ON LUMINOSITY MEASUREMENTS. II. THE FULL SAMPLE OF REVERBERATION-MAPPED AGNs”, *The Astrophysical Journal*, v. 697, n. 1 (apr), pp. 160. doi: 10.1088/0004-637X/697/1/160. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/697/1/160>>.
- Bentz, M. C., Denney, K. D., Grier, C. J., et al., 2013, “THE LOW-LUMINOSITY END OF THE RADIUS-LUMINOSITY RELATIONSHIP FOR ACTIVE GALACTIC NUCLEI”, *The Astrophysical Journal*, v. 767, n. 2. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1088/0004-637x/767/2/149. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/767/2/149>>.
- Binette, L., Magris, C. G., Stasińska, G., et al., 1994, “Photoionization in elliptical galaxies by old stars.” *Astron. Astrophys.*, v. 292 (dez.), pp. 13–19.
- Bower, C. A., Wilson, A. S., Heckman, T. M., et al., 1996, “Stellar Kinematics and Double-Peaked Broad Emission Lines in the Nearby LINER M81”. In: Eracleous, M., Koratkar, A., Leitherer, C., et al. (Eds.), *The Physics of Liners in View of Recent Observations*, v. 103, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 163, jan.
- Brenneman, L. W., Weaver, K. A., Kadler, M., et al., 2009, “Spectral Analysis of the Accretion Flow in NGC 1052 with Suzaku”, *Astrophys. J.*, v. 698, n. 1 (jun.), pp. 528–540. doi: 10.1088/0004-637X/698/1/528.

- Calabrò, A., Daddi, E., Cassata, P., et al., 2018, “Near-infrared Emission Lines in Starburst Galaxies at $0.5 < z < 0.9$: Discovery of a Merger Sequence of Extreme Obscurations”, *Astrophys. J. Lett.*, 862(2):L22. doi: 10.3847/2041-8213/aad33e.
- Calabrò, A., Daddi, E., Puglisi, A., et al., 2019, “Deciphering an evolutionary sequence of merger stages in infrared-luminous starburst galaxies at $z \sim 0.7$ ”, *Astron. Astrophys.*, 623:A64. doi: 10.1051/0004-6361/201834522.
- Calabrò, A., Pentericci, L., Feltre, A., et al., 2023, “Near-infrared emission line diagnostics for AGN from the local Universe to $z \sim 3$ ”, *Astron. Astrophys.*, 679:A80. doi: 10.1051/0004-6361/202347190.
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., Mathis, J. S., 1989a, “The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction”, *Astrophys. J.*, v. 345 (out.), pp. 245. doi: 10.1086/167900.
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., Mathis, J. S., 1989b, “The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction”, *Astrophys. J.*, v. 345 (out.), pp. 245. doi: 10.1086/167900.
- Cazzoli, S., Márquez, I., Masegosa, J., et al., 2018, “Optical spectroscopy of local type-1 AGN LINERs”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 480, n. 1 (out.), pp. 1106–1162. doi: 10.1093/mnras/sty1811.
- Cazzoli, S., Hermosa Muñoz, L., Marquez, I., et al., 2020, “Unexplored outflows and feedback in low-luminosity AGNs: the case of NGC1052”. In: *XIV.0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society*, p. 19, jul.
- Cerqueira-Campos, F. C., Rodríguez-Ardila, A., Riffel, R., et al., 2021, “Coronal-line forest active galactic nuclei - I. Physical properties of the emission-line regions”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 500, n. 2 (jan.), pp. 2666–2684. doi: 10.1093/mnras/staa3320.
- Cheung, E., Bundy, K., Cappellari, M., et al., 2016, “Suppressing star formation in quiescent galaxies with supermassive black hole winds”, *Nature*, v. 533, n. 7604 (maio), pp. 504–508. doi: 10.1038/nature18006.
- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Mateus, A., et al., 2011, “A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN?” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 413, n. 3 (maio), pp. 1687–1699. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18244.x.

- Cid Fernandes, R., Pérez, E., García Benito, R., et al., 2013, “Resolving galaxies in time and space. I. Applying STARLIGHT to CALIFA datacubes”, *Astron. Astrophys.*, 557:A86. doi: 10.1051/0004-6361/201220616.
- Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., et al., 2005, “Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 358, n. 2 (abr.), pp. 363–378. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.08752.x.
- Cid Fernandes, R., 2018, “On tests of full spectral fitting algorithms”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 480, n. 4 (08), pp. 4480–4488. ISSN: 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/sty2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/sty2012>>.
- Claussen, M. J., Diamond, P. J., Braatz, J. A., et al., 1998, “The Water Masers in the Elliptical Galaxy NGC 1052”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 500, n. 2 (jun.), pp. L129–L132. doi: 10.1086/311405.
- Colina, L., Piqueras López, J., Arribas, S., et al., 2015a, “Understanding the two-dimensional ionization structure in luminous infrared galaxies. A near-IR integral field spectroscopy perspective”, *Astron. Astrophys.*, 578:A48. doi: 10.1051/0004-6361/201425567.
- Colina, L., Piqueras López, J., Arribas, S., et al., 2015b, “Understanding the two-dimensional ionization structure in luminous infrared galaxies. A near-IR integral field spectroscopy perspective”, *Astron. Astrophys.*, 578:A48. doi: 10.1051/0004-6361/201425567.
- Dahmer-Hahn, L. G., Riffel, R., Steiner, J. E., et al., 2019, “A panchromatic spatially resolved study of the inner 500 pc of NGC 1052 - I. Stellar population”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 482, n. 4 (fev.), pp. 5211–5221. doi: 10.1093/mnras/sty3051.
- Devereux, N., 2011, “Time Variable Broad-line Emission in NGC 4203: Evidence for Stellar Contrails”, *Astrophys. J.*, 743(1):83. doi: 10.1088/0004-637X/743/1/83.
- Di Matteo, T., Springel, V., Hernquist, L., 2005, “Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies”, *Nature*, v. 433, n. 7026 (fev.), pp. 604–607. doi: 10.1038/nature03335.
- Dopita, M. A., Sutherland, R. S., 1995, “Spectral Signatures of Fast Shocks. II. Optical Diagnostic Diagrams”, *Astrophys. J.*, v. 455 (dez.), pp. 468. doi: 10.1086/176596.

- Fabian, A. C., 2012, “Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 50 (set.), pp. 455–489. doi: 10.1146/annurev-astro-081811-125521.
- Falocco, S., Larsson, J., Nandi, S., 2020, “Accretion and jets in a low-luminosity AGN: the nucleus of NGC 1052”, *Astron. Astrophys.*, 638:A67. doi: 10.1051/0004-6361/202037516.
- Fanaroff, B. L., Riley, J. M., 1974, “The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 167 (maio), pp. 31P–36P. doi: 10.1093/mnras/167.1.31P.
- Fath, E. A., 1909, “The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters”, *Lick Observatory Bulletin*, v. 149 (jan.), pp. 71–77. doi: 10.5479/ADS/bib/1909LicOB.5.71F.
- Ferland, G. J., Netzer, H., 1983, “Are there any shock-heated galaxies ?” *Astrophys. J.*, v. 264 (jan.), pp. 105–113. doi: 10.1086/160577.
- Fernández-Arenas, D., Rousseau-Nepton, L., Robert, C., et al., 2025, “Ionized gas in NGC 4258: Exploring the AGN – Star formation connection”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:2507.16153. doi: 10.48550/arXiv.2507.16153.
- Fernández-Ontiveros, J. A., López-Sanjuan, C., Montes, M., et al., 2011, “The most recent burst of star formation in the massive elliptical galaxy NGC 1052”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 411, n. 1 (fev.), pp. L21–L25. doi: 10.1111/j.1745-3933.2010.00985.x.
- Ferrarese, L., Merritt, D., 2000, “A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 539, n. 1 (ago.), pp. L9–L12. doi: 10.1086/312838.
- Filho, M. E., Barthel, P. D., Ho, L. C., 2002, “Light-year scale radio cores in four LINER galaxies”, *Astron. Astrophys.*, v. 385 (abr.), pp. 425–430. doi: 10.1051/0004-6361:20020138.
- Filho, M. E., Barthel, P. D., Ho, L. C., 2006, “A radio census of nuclear activity in nearby galaxies”, *Astronomy amp; Astrophysics*, v. 451, n. 1 (abr.), pp. 71–83. ISSN: 1432-0746. doi: 10.1051/0004-6361:20054510. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20054510>>.
- Filippenko, A. V., Terlevich, R., 1992, “O-Star Photoionization Models of Liners with Weak [O i] lambda 6300 Emission”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 397 (out.), pp. L79. doi: 10.1086/186549.

- Fitzpatrick, E. L., 1999, “Correcting for the Effects of Interstellar Extinction”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 111, n. 755 (jan.), pp. 63–75. doi: 10.1086/316293.
- Flohic, H. M. L. G., Eracleous, M., Chartas, G., et al., 2006, “The Central Engines of 19 LINERs as Viewed by Chandra”, *Astrophys. J.*, v. 647, n. 1 (ago.), pp. 140–160. doi: 10.1086/505296.
- Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., et al., 2000, “A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 539, n. 1 (ago.), pp. L13–L16. doi: 10.1086/312840.
- Gehrels, N., 1986, “Confidence Limits for Small Numbers of Events in Astrophysical Data”, *Astrophys. J.*, v. 303 (abr.), pp. 336. doi: 10.1086/164079.
- Ginsburg, A., Mirocha, J., 2011. “PySpecKit: Python Spectroscopic Toolkit”. *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1109.001, set.
- Ginsburg, A., Sokolov, V., de Val-Borro, M., et al., 2022, “Pyspeckit: A Spectroscopic Analysis and Plotting Package”, *Astron. J.*, 163(6):291. doi: 10.3847/1538-3881/ac695a.
- Giommi, P., Padovani, P., Polenta, G., et al., 2012, “A simplified view of blazars: clearing the fog around long-standing selection effects”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 420, n. 4 (mar.), pp. 2899–2911. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20044.x.
- Girardi, L., Groenewegen, M. A. T., Hatziminaoglou, E., et al., 2005, “Star counts in the Galaxy. Simulating from very deep to very shallow photometric surveys with the TRILEGAL code”, *Astron. Astrophys.*, v. 436, n. 3 (jun.), pp. 895–915. doi: 10.1051/0004-6361:20042352.
- Gonzalez-Delgado, R. M., Perez, E., Tenorio-Tagle, G., et al., 1994, “Violent Star Formation in NGC 2363”, *Astrophys. J.*, v. 437 (dez.), pp. 239. doi: 10.1086/174992.
- González-Martín, O., Masegosa, J., Márquez, I., et al., 2009, “An X-ray view of 82 LINERs with Chandra and XMM-Newton data”, *Astron. Astrophys.*, v. 506, n. 3 (nov.), pp. 1107–1121. doi: 10.1051/0004-6361/200912288.
- González-Martín, O., Díaz-González, D., Acosta-Pulido, J. A., et al., 2014, “Synapses of active galactic nuclei: Comparing X-ray and optical classifications using artificial neural networks”, *Astron. Astrophys.*, 567:A92. doi: 10.1051/0004-6361/201322592.
- González-Martín, O., Masegosa, J., Márquez, I., et al., 2015, “Nuclear obscuration in LINERs. Clues from Spitzer/IRS spectra on the Compton thickness

- and the existence of the dusty torus”, *Astron. Astrophys.*, 578:A74. doi: 10.1051/0004-6361/201425254.
- Goodrich, R. W., 1995, “Dust in the Broad-Line Regions of Seyfert Galaxies”, *Astrophys. J.*, v. 440 (fev.), pp. 141. doi: 10.1086/175256.
- Grossan, B., Gorjian, V., Werner, M., et al., 2001, “High-Resolution Mid-Infrared Images of the Nucleus of M81”, *Astrophys. J.*, v. 563, n. 2 (dez.), pp. 687–693. doi: 10.1086/323948.
- Haardt, F., Maraschi, L., 1991, “A Two-Phase Model for the X-Ray Emission from Seyfert Galaxies”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 380 (out.), pp. L51. doi: 10.1086/186171.
- Haardt, F., Maraschi, L., 1993, “X-Ray Spectra from Two-Phase Accretion Disks”, *Astrophys. J.*, v. 413 (ago.), pp. 507. doi: 10.1086/173020.
- Halpern, J. P., Steiner, J. E., 1983, “Low ionization active galactic nuclei : X-ray or shock heated ?” *Astrophys. J. Lett.*, v. 269 (jun.), pp. L37–L41. doi: 10.1086/184051.
- Harms, R. J., Ford, H. C., Tsvetanov, Z. I., et al., 1994, “HST FOS Spectroscopy of M87: Evidence for a Disk of Ionized Gas around a Massive Black Hole”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 435 (nov.), pp. L35. doi: 10.1086/187588.
- Heckman, T. M., 1980, “An Optical and Radio Survey of the Nuclei of Bright Galaxies - Activity in the Normal Galactic Nuclei”, *Astron. Astrophys.*, v. 87 (jul.), pp. 152.
- Hernández-García, L., González-Martín, O., Márquez, I., et al., 2013, “X-ray spectral variability of seven LINER nuclei with XMM-Newton and Chandra data”, *Astron. Astrophys.*, 556:A47. doi: 10.1051/0004-6361/201321563.
- Herrnstein, J. R., 1999, “VLBA Observations of the Masers in NGC 4258: A Unique Window into the Sub-Parsec-Scale World of an Active Galactic Nucleus”. In: *American Astronomical Society Meeting Abstracts #194*, v. 194, *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, p. 62.02, maio.
- Ho, L. C., 2008, “Nuclear activity in nearby galaxies.” *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 46 (set.), pp. 475–539. doi: 10.1146/annurev.astro.45.051806.110546.
- Ho, L. C., Filippenko, A. V., Sargent, W. L., 1995, “A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. II. an Optical Spectral Atlas of the Nuclei of Nearby Galaxies”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 98 (jun.), pp. 477. doi: 10.1086/192170.

- Ho, L. C., 1999, “The Spectral Energy Distributions of Low-Luminosity Active Galactic Nuclei”, *Astrophys. J.*, v. 516, n. 2 (maio), pp. 672–682. doi: 10.1086/307137.
- Ho, L. C., Filippenko, A. V., Sargent, W. L. W., et al., 1997, “A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. IV. Nuclei with Broad H α Emission”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 112, n. 2 (out.), pp. 391–414. doi: 10.1086/313042.
- Ho, L. C., Rudnick, G., Rix, H., et al., 2000, “Double-peaked Broad Emission Lines in NGC 4450 and Other LINERs”, *The Astrophysical Journal*, v. 541, n. 1 (set.), pp. 120–125. ISSN: 1538-4357. doi: 10.1086/309440. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/309440>>.
- Hönig, S. F., 2019, “Redefining the Torus: A Unifying View of AGNs in the Infrared and Submillimeter”, *Astrophys. J.*, 884(2):171. doi: 10.3847/1538-4357/ab4591.
- Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., et al., 2006, “A Unified, Merger-driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 163, n. 1 (mar.), pp. 1–49. doi: 10.1086/499298.
- Hoyle, F., Fowler, W. A., 1963, “On the nature of strong radio sources”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 125 (jan.), pp. 169. doi: 10.1093/mnras/125.2.169.
- Hummel, E., van der Hulst, J. M., Dickey, J. M., 1984, “Central radio sources in spiral galaxies. Starburst or accretion.” *Astron. Astrophys.*, v. 134 (maio), pp. 207–221.
- Iyomoto, N., Makishima, K., Matsushita, K., et al., 1998, “Low-Luminosity X-Ray Active Galactic Nuclei in S0 Galaxies NGC 3065 and NGC 4203”, *Astrophys. J.*, v. 503, n. 1 (ago.), pp. 168–173. doi: 10.1086/305974.
- Kadler, M., Kerp, J., Ros, E., et al., 2004, “Jet emission in <ASTROBJ>NGC 1052</ASTROBJ> at radio, optical, and X-ray frequencies”, *Astron. Astrophys.*, v. 420 (jun.), pp. 467–474. doi: 10.1051/0004-6361:20034126.
- Kaspi, S., Maoz, D., Netzer, H., et al., 2005, “The Relationship between Luminosity and Broad-Line Region Size in Active Galactic Nuclei”, *Astrophys. J.*, v. 629, n. 1 (ago.), pp. 61–71. doi: 10.1086/431275.
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., et al., 2003, “The host galaxies of active galactic nuclei”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 346, n. 4 (dez.), pp. 1055–1077. doi: 10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x.

- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., et al., 2001, “Theoretical Modeling of Starburst Galaxies”, *Astrophys. J.*, v. 556, n. 1 (jul.), pp. 121–140. doi: 10.1086/321545.
- Khachikian, E. E., Weedman, D. W., 1971, “A spectroscopic study of luminous galactic nuclei.” *Astrofizika*, v. 7 (jan.), pp. 389–406.
- King, A., Pounds, K., 2015, “Powerful Outflows and Feedback from Active Galactic Nuclei”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 53 (ago.), pp. 115–154. doi: 10.1146/annurev-astro-082214-122316.
- Kormendy, J., Ho, L. C., 2013a, “Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 51, n. 1 (ago.), pp. 511–653. doi: 10.1146/annurev-astro-082708-101811.
- Kormendy, J., Ho, L. C., 2013b, “Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies”, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, v. 51, n. 1 (ago.), pp. 511–653. doi: 10.1146/annurev-astro-082708-101811.
- Koski, A. T., 1978, “Spectrophotometry of Seyfert 2 galaxies and narrow-line radio galaxies.” *Astrophys. J.*, v. 223 (jul.), pp. 56–73. doi: 10.1086/156235.
- Kroupa, P., 2001, “On the variation of the initial mass function”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 322, n. 2 (abr.), pp. 231–246. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x.
- Kuhn, L., Shangguan, J., Davies, R., et al., 2024, “Broad-line region geometry from multiple emission lines in a single-epoch spectrum”, *Astron. Astrophys.*, 684: A52. doi: 10.1051/0004-6361/202348138.
- Landt, H., Bentz, M. C., Ward, M. J., et al., 2008, “The Near-Infrared Broad Emission Line Region of Active Galactic Nuclei. I. The Observations”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 174, n. 2 (fev.), pp. 282–312. doi: 10.1086/522373.
- Larkin, J. E., Armus, L., Knop, R. A., et al., 1998a, “A Near-Infrared Spectroscopic Survey of LINER Galaxies”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 114, n. 1 (jan.), pp. 59–72. doi: 10.1086/313063.
- Larkin, J. E., Armus, L., Knop, R. A., et al., 1998b, “A Near-Infrared Spectroscopic Survey of LINER Galaxies”, *Astrophys. J. Suppl.*, v. 114, n. 1 (jan.), pp. 59–72. doi: 10.1086/313063.
- Lasota, J. P., Abramowicz, M. A., Chen, X., et al., 1996, “Is the Accretion Flow in NGC 4258 Advection Dominated?” *Astrophys. J.*, v. 462 (maio), pp. 142. doi: 10.1086/177137.

- Ledlow, M. J., Owen, F. N., 1996, “20 CM VLA Survey of Abell Clusters of Galaxies. VI. Radio/Optical Luminosity Functions”, *Astron. J.*, v. 112 (jul.), pp. 9. doi: 10.1086/117985.
- Loubser, S. I., Soechting, I. K., 2013, “The detailed nature of active central cluster galaxies”. In: Wong, T., Ott, J. (Eds.), *Molecular Gas, Dust, and Star Formation in Galaxies*, v. 292, *IAU Symposium*, pp. 158–158, mar. doi: 10.1017/S1743921313000884.
- Maoz, D., 2007, “Low-luminosity active galactic nuclei: are they UV faint and radio loud?” *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 377, n. 4 (jun.), pp. 1696–1710. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.11735.x.
- Maoz, D., Nagar, N. M., Falcke, H., et al., 2005, “The Murmur of the Sleeping Black Hole: Detection of Nuclear Ultraviolet Variability in LINER Galaxies”, *Astrophys. J.*, v. 625, n. 2 (jun.), pp. 699–715. doi: 10.1086/429795.
- Maraston, C., 2005, “Evolutionary population synthesis: models, analysis of the ingredients and application to high-z galaxies”, *Mon. Not, Roy. Astron. Soc.*, v. 362, n. 3 (set.), pp. 799–825. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09270.x.
- Márquez, I., Masegosa, J., González-Martin, O., et al., 2017, “The AGN nature of LINER nuclear sources”, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 4:34. doi: 10.3389/fspas.2017.00034.
- Masini, A., Wijesekera, J. V., Celotti, A., et al., 2022, “Comprehensive X-ray view of the active nucleus in NGC 4258”, *Astron. Astrophys.*, 663:A87. doi: 10.1051/0004-6361/202243231.
- Mason, R. E., Lopez-Rodriguez, E., Packham, C., et al., 2012, “THE NUCLEAR INFRARED EMISSION OF LOW-LUMINOSITY ACTIVE GALACTIC NUCLEI”, *The Astronomical Journal*, v. 144, n. 1 (jun.), pp. 11. ISSN: 1538-3881. doi: 10.1088/0004-6256/144/1/11. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/144/1/11>>.
- Mason, R. E., Ramos Almeida, C., Levenson, N. A., et al., 2013, “The Role of the Accretion Disk, Dust, and Jets in the IR Emission of Low-luminosity Active Galactic Nuclei”, *Astrophys. J.*, 777(2):164. doi: 10.1088/0004-637X/777/2/164.
- Mason, R. E., Rodríguez-Ardila, A., Martins, L., et al., 2015, “THE NUCLEAR NEAR-INFRARED SPECTRAL PROPERTIES OF NEARBY GALAXIES”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 217, n. 1 (mar.), pp. 13.

ISSN: 1538-4365. doi: 10.1088/0067-0049/217/1/13. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/217/1/13>>.

- McKernan, B., Ford, K. E. S., Reynolds, C. S., 2010, “Black hole mass, host galaxy classification and AGN activity”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 407, n. 4 (out.), pp. 2399–2410. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17068.x.
- Menezes, R. B., da Silva, P., Steiner, J. E., 2018, “The molecular H₂ and stellar discs in the nuclear region of NGC 4258”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 473, n. 2 (jan.), pp. 2198–2211. doi: 10.1093/mnras/stx2448.
- Miyoshi, M., Moran, J., Herrnstein, J., et al., 1995, “Evidence for a black hole from high rotation velocities in a sub-parsec region of NGC4258”, *Nature*, v. 373, n. 6510 (jan.), pp. 127–129. doi: 10.1038/373127a0.
- Morisset, C., Delgado-Inglada, G., Flores-Fajardo, N., 2015, “A virtual observatory for photoionized nebulae: the Mexican Million Models database (3MdB).” *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, v. 51 (abr.), pp. 103–120. doi: 10.48550/arXiv.1412.5349.
- Mould, J., Reynolds, T., Readhead, T., et al., 2012, “Infrared Spectroscopy of Nearby Radio Active Elliptical Galaxies”, *Astrophys. J. Suppl.*, 203(1):14. doi: 10.1088/0067-0049/203/1/14.
- Mouri, H., Kawara, K., Taniguchi, Y., 2000, “Excitation Mechanism of Near-Infrared [Fe II] Emission in Seyfert and Starburst Galaxies”, *Astrophys. J.*, v. 528, n. 1 (jan.), pp. 186–200. doi: 10.1086/308142.
- Nagar, N. M., Falcke, H., Wilson, A. S., et al., 2002, “Radio sources in low-luminosity active galactic nuclei. III. “AGNs“ in a distance-limited sample of “LLAGNs””, *Astron. Astrophys.*, v. 392 (set.), pp. 53–82. doi: 10.1051/0004-6361:20020874.
- Narayan, R., Yi, I., 1995, “Advection-dominated Accretion: Self-Similarity and Bipolar Outflows”, *Astrophys. J.*, v. 444 (maio), pp. 231. doi: 10.1086/175599.
- Nemmen, R., Storchi-Bergmann, T., Eracleous, M., 2011, “Spectral Energy Distribution Models for Low-luminosity Active Galactic Nuclei in LINERs”, *arXiv e-prints*, art. arXiv:1112.4640. doi: 10.48550/arXiv.1112.4640.
- Nemmen, R. S., Storchi-Bergmann, T., Eracleous, M., 2014, “Spectral models for low-luminosity active galactic nuclei in LINERs: the role of advection-dominated accretion and jets”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 438, n. 4 (mar.), pp. 2804–2827. doi: 10.1093/mnras/stt2388.

- Netzer, H., 2013, *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*.
- Oliva, E., Moorwood, A. F. M., Danziger, I. J., 1989, “Infrared Spectroscopy of Supernova Remnants”, *Astron. Astrophys.*, v. 214 (abr.), pp. 307.
- Osorio-Clavijo, N., González-Martín, O., Papadakis, I. E., et al., 2020, “The inner view of NGC 1052 using multiple X-ray observations”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 491, n. 1 (jan.), pp. 29–38. doi: 10.1093/mnras/stz2785.
- Osterbrock, D. E., 1981, “Seyfert galaxies with weak broad H alpha emission lines”, *Astrophys. J.*, v. 249 (out.), pp. 462–470. doi: 10.1086/159306.
- Osterbrock, D. E., 1989, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*.
- Osterbrock, D. E., Ferland, G. J., 2006a, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*.
- Osterbrock, D. E., Ferland, G. J., 2006b, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*.
- Padovani, P., 2017, “On the two main classes of active galactic nuclei”, *Nature Astronomy*, 1:0194. doi: 10.1038/s41550-017-0194.
- Paturel, G., Petit, C., Prugniel, P., et al., 2003, “HYPERLEDA. I. Identification and designation of galaxies”, *Astron. Astrophys.*, v. 412 (dez.), pp. 45–55. doi: 10.1051/0004-6361:20031411.
- Peterson, B. M., 1997, *An Introduction to Active Galactic Nuclei*.
- Pian, E., Romano, P., Maoz, D., et al., 2010, “Variability and spectral energy distributions of low-luminosity active galactic nuclei: a simultaneous X-ray/UV look with Swift”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 401, n. 1 (jan.), pp. 677–686. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15689.x.
- Ptak, A., Terashima, Y., Ho, L. C., et al., 2004, “Testing Radiatively Inefficient Accretion Flow Theory: An XMM-Newton Observation of NGC 3998”, *Astrophys. J.*, v. 606, n. 1 (maio), pp. 173–184. doi: 10.1086/382940.
- Reichert, G. A., Branduardi-Raymont, G., Filippenko, A. V., et al., 1992, “Spatially Resolved Ultraviolet Spectroscopy of the Liner Galaxy NGC 3998”, *Astrophys. J.*, v. 387 (mar.), pp. 536. doi: 10.1086/171105.
- Ricci, F., Treister, E., Bauer, F. E., et al., 2022, “BASS. XXIX. The Near-infrared View of the Broad-line Region (BLR): The Effects of Obscuration in BLR Characterization”, *Astrophys. J. Suppl.*, 261(1):8. doi: 10.3847/1538-4365/ac5b67.

- Ricci, T. V., Steiner, J. E., Menezes, R. B., 2015, “IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - III. Properties of the circumnuclear gas emission”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 451, n. 4 (ago.), pp. 3728–3758. doi: 10.1093/mnras/stv1156.
- Riffel, R., Rodríguez-Ardila, A., Pastoriza, M. G., 2006a, “A 0.8-2.4 μm spectral atlas of active galactic nuclei”, *Astron. Astrophys.*, v. 457, n. 1 (out.), pp. 61–70. doi: 10.1051/0004-6361:20065291.
- Riffel, R., Pastoriza, M. G., Rodríguez-Ardila, A., et al., 2009, “Probing the near-infrared stellar population of Seyfert galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 400, n. 1 (nov.), pp. 273–290. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15448.x.
- Riffel, R., Rodríguez-Ardila, A., Aleman, I., et al., 2013a, “Molecular hydrogen and [Fe II] in active galactic nuclei - III. Low-ionization nuclear emission-line region and star-forming galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 430, n. 3 (abr.), pp. 2002–2017. doi: 10.1093/mnras/stt026.
- Riffel, R. A., Storchi-Bergmann, T., Winge, C., et al., 2006b, “Gemini near-infrared integral field spectroscopy of the narrow-line region of ESO428-G14: kinematics, excitation and the role of the radio jet”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 373, n. 1 (nov.), pp. 2–12. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.11050.x.
- Riffel, R. A., Storchi-Bergmann, T., Riffel, R., et al., 2013b, “A correlation between the stellar and [Fe II] velocity dispersions in active galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 429, n. 3 (mar.), pp. 2587–2593. doi: 10.1093/mnras/sts536.
- Riffel, R., Rodríguez-Ardila, A., Brotherton, M. S., et al., 2019, “Optical/NIR stellar absorption and emission-line indices from luminous infrared galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 486, n. 3 (jul.), pp. 3228–3247. doi: 10.1093/mnras/stz1077.
- Rodríguez-Ardila, A., Pastoriza, M. G., Viegas, S., et al., 2004, “Molecular hydrogen and [Fe II] in Active Galactic Nuclei”, *Astron. Astrophys.*, v. 425 (out.), pp. 457–474. doi: 10.1051/0004-6361:20034285.
- Rodríguez-Ardila, A., Riffel, R., Pastoriza, M. G., 2005, “Molecular hydrogen and [FeII] in active galactic nuclei - II. Results for Seyfert 2 galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 364, n. 3 (dez.), pp. 1041–1053. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09638.x.
- Rodríguez-Ardila, A., Mason, R. E., Martins, L., et al., 2017, “The complex, dusty narrow-line region of NGC 4388: gas-jet interactions, outflows and extinction

- revealed by near-IR spectroscopy”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 465, n. 1 (fev.), pp. 906–925. doi: 10.1093/mnras/stw2642.
- Rudolf, N., Günther, H. M., Schneider, P. C., et al., 2016, “Modelling telluric line spectra in the optical and infrared with an application to VLT/X-Shooter spectra”, *Astron. Astrophys.*, 585:A113. doi: 10.1051/0004-6361/201322749.
- Salpeter, E. E., 1964, “Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects.” *Astrophys. J.*, v. 140 (ago.), pp. 796–800. doi: 10.1086/147973.
- Sarzi, M., Rix, H.-W., Shields, J. C., et al., 2005, “The Stellar Populations in the Central Parsecs of Galactic Bulges”, *Astrophys. J.*, v. 628, n. 1 (jul.), pp. 169–186. doi: 10.1086/428637.
- Sarzi, M., Falcón-Barroso, J., Davies, R. L., et al., 2006, “The SAURON project - V. Integral-field emission-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 366, n. 4 (mar.), pp. 1151–1200. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09839.x.
- Schmidt, M., 1963, “3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift”, *Nature*, v. 197, n. 4872 (mar.), pp. 1040. doi: 10.1038/1971040a0.
- Seaton, M. J., 1979, “Interstellar extinction in the UV.” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 187 (jan.), pp. 73. doi: 10.1093/mnras/187.1.73P.
- Seyfert, C. K., 1943, “Nuclear Emission in Spiral Nebulae.” *Astrophys. J.*, v. 97 (jan.), pp. 28. doi: 10.1086/144488.
- Shields, J. C., Rix, H.-W., McIntosh, D. H., et al., 2000, “Evidence for a Black Hole and Accretion Disk in the LINER NGC 4203”, *The Astrophysical Journal*, v. 534, n. 1 (maio), pp. L27–L30. ISSN: 0004-637X. doi: 10.1086/312660. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/312660>>.
- Singh, R., van de Ven, G., Jahnke, K., et al., 2013, “The nature of LINER galaxies: Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes”, *Astron. Astrophys.*, 558:A43. doi: 10.1051/0004-6361/201322062.
- Smith, H. A., Li, A., Li, M. P., et al., 2010, “Anomalous Silicate Dust Emission in the Type 1 Liner Nucleus of M81”, *Astrophys. J.*, v. 716, n. 1 (jun.), pp. 490–503. doi: 10.1088/0004-637X/716/1/490.
- Sridhar, S. S., Morganti, R., Nyland, K., et al., 2020, “LOFAR view of NGC 3998, a sputtering AGN”, *Astron. Astrophys.*, 634:A108. doi: 10.1051/0004-6361/201936796.

- Stasinska, G., 2011, “HOLMES and little monsters”. In: *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, v. 40, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, pp. 96–97, out. doi: 10.48550/arXiv.1103.0307.
- Stasińska, G., Vale Asari, N., Cid Fernandes, R., et al., 2008, “Can retired galaxies mimic active galaxies? Clues from the Sloan Digital Sky Survey”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 391, n. 1 (nov.), pp. L29–L33. doi: 10.1111/j.1745-3933.2008.00550.x.
- Stasińska, G., Cid Fernandes, R., Mateus, A., et al., 2006, “Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - III. How to distinguish AGN hosts”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 371, n. 2 (set.), pp. 972–982. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10732.x.
- Storchi-Bergmann, T., Schimoia, J. S., Peterson, B. M., et al., 2017, “Double-Peaked Profiles: Ubiquitous Signatures of Disks in the Broad Emission Lines of Active Galactic Nuclei”, *Astrophys. J.*, 835(2):236. doi: 10.3847/1538-4357/835/2/236.
- Storchi-Bergmann, T., Baldwin, J. A., Wilson, A. S., 1993, “Double-peaked Broad Line Emission from the LINER Nucleus of NGC 1097”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 410 (jun.), pp. L11. doi: 10.1086/186867.
- Sutherland, R., Dopita, M., Binette, L., et al., 2018. “MAPPINGS V: Astrophysical plasma modeling code”. *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1807.005, jul.
- Terashima, Y., Wilson, A. S., 2002. “Chandra Snapshot Observations of LINERs with a Compact Radio Core”. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0206018>>.
- Terlevich, R., Melnick, J., 1985, “Warmers : the missing link between Starburst and Seyfert galaxies.” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 213 (abr.), pp. 841–856. doi: 10.1093/mnras/213.4.841.
- Trzeźniewski, T., Czerny, B., Karas, V., et al., 2011, “The flare model for X-ray variability of NGC 4258”, *Astron. Astrophys.*, 530:A136. doi: 10.1051/0004-6361/201016369.
- Urry, C. M., Padovani, P., 1995, “Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, v. 107 (set.), pp. 803. doi: 10.1086/133630.
- Vanden Berk, D. E., Richards, G. T., Bauer, A., et al., 2001, “Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey”, *Astron. J.*, v. 122, n. 2 (ago.), pp. 549–564. doi: 10.1086/321167.

- Vazdekis, A., Koleva, M., Ricciardelli, E., et al., 2016, “UV-extended E-MILES stellar population models: young components in massive early-type galaxies”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 463, n. 4 (dez.), pp. 3409–3436. doi: 10.1093/mnras/stw2231.
- Verro, K., Trager, S. C., Peletier, R. F., et al., 2022a, “Modelling simple stellar populations in the near-ultraviolet to near-infrared with the X-shooter Spectral Library (XSL)”, *Astron. Astrophys.*, 661:A50. doi: 10.1051/0004-6361/202142387.
- Verro, K., Trager, S. C., Peletier, R. F., et al., 2022b, “The X-shooter Spectral Library (XSL): Data Release 3”, *Astron. Astrophys.*, 660:A34. doi: 10.1051/0004-6361/202142388.
- Weaver, K. A., Wilson, A. S., Henkel, C., et al., 1999, “X-Ray Emission from the Prototypical LINER Galaxy NGC 1052”, *Astrophys. J.*, v. 520, n. 1 (jul.), pp. 130–136. doi: 10.1086/307456.
- Wilkes, B. J., Schmidt, G. D., Smith, P. S., et al., 1995, “Optical Detection of the Hidden Nuclear Engine in NGC 4258”, *Astrophys. J. Lett.*, v. 455 (dez.), pp. L13. doi: 10.1086/309817.
- Williams, D. R. A., Pahari, M., Baldi, R. D., et al., 2022, “LeMMINGs - IV. The X-ray properties of a statistically complete sample of the nuclei in active and inactive galaxies from the Palomar sample”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 510, n. 4 (mar.), pp. 4909–4928. doi: 10.1093/mnras/stab3310.
- Wilson, A. S., Colbert, E. J. M., 1995, “The Difference between Radio-loud and Radio-quiet Active Galaxies”, *Astrophys. J.*, v. 438 (jan.), pp. 62. doi: 10.1086/175054.
- Wilson, A. S., Yang, Y., Cecil, G., 2001, “Chandra Observations and the Nature of the Anomalous Arms of NGC 4258 (M106)”, *Astrophys. J.*, v. 560, n. 2 (out.), pp. 689–697. doi: 10.1086/322766.
- Woltjer, L., 1959, “Emission Nuclei in Galaxies.” *Astrophys. J.*, v. 130 (jul.), pp. 38. doi: 10.1086/146694.
- Yıldız, M. K., Serra, P., Oosterloo, T. A., et al., 2015, “Star formation in the outer regions of the early-type galaxy NGC 4203”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 451, n. 1 (jul.), pp. 103–113. doi: 10.1093/mnras/stv992.
- Younes, G., Porquet, D., Sabra, B., et al., 2011, “Study of LINER sources with broad H α emission. X-ray properties and comparison to luminous AGN and X-ray binaries”, *Astron. Astrophys.*, 530:A149. doi: 10.1051/0004-6361/201116806.

- Younes, G., Porquet, D., Sabra, B., et al., 2012, “Study of LINER sources with broad H α emission. Spectral energy distribution and multiwavelength correlations”, *Astron. Astrophys.*, 539:A104. doi: 10.1051/0004-6361/201118299.
- Younes, G., Ptak, A., Ho, L. C., et al., 2019, “NuStar Hard X-Ray View of Low-luminosity Active Galactic Nuclei: High-energy Cutoff and Truncated Thin Disk”, *Astrophys. J.*, 870(2):73. doi: 10.3847/1538-4357/aaf38b.
- Yuan, F., Markoff, S., Falcke, H., et al., 2002, “NGC 4258: A jet-dominated low-luminosity AGN?” *Astron. Astrophys.*, v. 391 (ago.), pp. 139–148. doi: 10.1051/0004-6361:20020817.

Apêndice A

Espectros

Nas figuras abaixo, apresento os espectros no infravermelho próximo das galáxias da amostra, obtidos após a subtração da contribuição estelar por meio da síntese espectral realizada com o código STARLIGHT. Os espectros estão organizados nas bandas $z+J$, H e K , e em cada painel destaco as principais linhas de emissão detectadas e medidas neste trabalho. Essas linhas são fundamentais para a construção dos diagramas de diagnóstico utilizados na reclassificação dos núcleos e na investigação dos mecanismos de excitação do gás.

