

Sarita Pereira de Carvalho

***N*₂, um indicador de metalicidade para AGN**

São José dos Campos, SP

2020

Sarita Pereira de Carvalho

***N*2, um indicador de metalicidade para AGN**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como parte do processo de avaliação para a obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Universidade do Vale do Paraíba – Univap

Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Oli Luiz Dors Junior

Coorientador: Prof^a Dr^a Ângela Cristina Krabbe

São José dos Campos, SP

2020

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Carvalho , Sarita Pereira de
N2, um indicador de metalicidade para AGN / Sarita Pereira de
Carvalho ; orientador, Oli Luiz Dors Junior; co-orientadora
Ângela Cristina Krabbe. - São José dos Campos, SP, 2020.
68 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José
dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Núcleo de Galáxias Ativas . 3.
Galáxias: abundâncias . 4. Galáxias: metalicidade . 5. Galáxias:
Seyfert . I. Dors Junior, Oli Luiz, orient. II. Krabbe, Ângela
Cristina , co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba.
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Sarita Pereira de Carvalho , autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em
outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o
usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado
respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de
propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e
profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 2 de Novembro de 2021.



Autor(a) da Obra

Data da defesa: 15 , Out , 2020

SARITA PEREIRA DE CARVALHO

“N2, UM INDICADOR DE METALICIDADE PARA AGNs.”

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. IRAPUAN RODRIGUES DE OLIVEIRA FILHO 

PROF. DR. OLI LUIZ DORS JUNIOR 

PROF.^a DR.^a ANGELA CRISTINA KRABBE 

PROF.^a DR.^a THAISA STORCHI BERGMANN - UFRGS 

PROF. DR. ROGEMAR ANDRÉ RIFFEL - UFSM 

Prof.^a Dr.^a Lúcia Vieira

Diretora do IP&D - Univap

São José dos Campos, 15 de outubro de 2020.

Ao meu pai
Salomão Pereira de Carvalho
(in memoriam).

Agradecimentos

Central, distrito de Xique-Xique, estado da Bahia, região nordeste do Brasil.

Um tempo em que as escolas ofereciam aulas do curso primário com diferentes séries em carteiras enfileiradas na mesma sala. As professoras, verdadeiras heroínas (a grande maioria era do sexo feminino, muitas vezes somente com o curso primário), se dividiam nos ensinamentos do primeiro ao quarto ano primário ao mesmo tempo. Quando o aluno apresentava melhor condição de entendimento era imediatamente transferido de uma fileira para outra, ou seja, de uma série primária para outra. Nosso personagem trilhou esta sala de aula e, em um único ano, alcançou o quarto ano primário.

Aos nove anos já gerenciava um comércio, o armazém de Loro, vendendo, fazendo contas no troco, o que era um grande feito para a época e local. O foco era permanente: melhorar as condições de vida que lhe eram oferecidas.

Mas a vida lhe apresentou uma surpresa inesperada: o falecimento de sua mãe, vítima de parto no nascimento de uma irmã. Como aquele espaço não lhe cabia mais, levando em consideração os seus anseios e vontade de prosperar, aos quinze vendeu um jegue junto com o irmão e com o valor comprou passagem em uma barca que cruzaria o Rio São Francisco com destino para São Paulo.

Chegando à cidade de São Paulo, deparou-se com o que jamais conheceria no nordeste: o inverno com baixas temperaturas. Sem alimento, sem condições, sem dinheiro e sem qualquer agasalho enfrentou literalmente a frieza da cidade grande.

Procurou por um tio que já vivia em São Paulo, o qual lhe proporcionou condições para que conseguisse seu primeiro emprego com carteira assinada: servente de pedreiro. Menino de cabeça chata, franzino, magro, vítima da fome, características que trazia na bagagem de retirante do nordeste. Em contrapartida apresentava uma facilidade de comunicação esmerada, a qual chamou a atenção dos demais trabalhadores e também dos superiores. Conversava sobre diversos assuntos com conhecimento esmerado. A facilidade em cálculos de matemática era notável. Autodidata e muito esforçado, debatia com graduados com notável maestria e conhecimento.

A oportunidade enfim apareceu: participou de um teste para um cargo administrativo na empresa, o que era um grande passo naquele momento. Para conseguir o emprego deixou para trás diversos letrados com níveis de escolaridade bem superiores a ele e iniciou o seu novo trabalho com bastante dedicação. O anseio ao conhecimento era imenso. Entretanto, teve que enfrentar o que hoje conhecemos por *bullying*. Em virtude de suas características físicas, era tratado por “baiano de Xique-Xique” (a cidade de Central era,

naquele momento, distrito de Xique-Xique). Venceu este obstáculo com ousadia: quando o chamavam por este apelido não respondia, mas quando o tratavam pelo nome correto, ou seja Salomão, imediatamente respondia: “Oba!” E desta forma, mostrou a que veio, seguindo seu caminho.

Teve 9 filhos, dentre eles, eu...

Não conseguiu cursar uma graduação ao longo da vida, terminando somente o curso de madureza, uma espécie de curso de educação de jovens e adultos que ministrava disciplinas dos antigos ginásio e colegial, hoje ensino médio. Transferiu este sonho para seus filhos. Sempre dizia que, ao menos um dos seus filhos deveria ser doutor... Pois é, estou aqui almejando este título e, claro, atendendo primeiramente o meu grande sonho e também o desejo de uma pessoa que levou a vida inteira para deixar meios para que isto se concretizasse, o que não deixa de ser um incentivo.

Embora tenha se colocado contrário a minha escolha no estudo da física, agradeço profundamente ao meu pai por ter vivido cada dia comigo, se desdobrando para ajudar a cumprir as obrigações com a família e se preocupando com meu bem estar, me amparando, me educando, dentro do que foi possível, com as mais diversas formas de amor, levando em conta que a contrariedade e o debate nos torna muito mais fortes para enfrentar as adversidades da vida.

Meu pai é um grande exemplo de luta e determinação. Faleceu em 2001, mas o seu legado permanece em cada um dos seus filhos. Não perderia a oportunidade de agradecê-lo e oferecer-lhe esta formatura. Obrigada, meu pai. Obrigada minha mãe. Obrigada à minha família pela total compreensão da minha ausência em diversos momentos.

Agradeço a cada professor ao longo de minha vida, em especial à minha primeira professora de física do ensino médio, Professora Eleonora , que me mostrou o quanto pode ser belo o estudo da natureza para um aluno na tenra idade; ao meu professor de física da graduação, Professor Luiz Alberto Maurício, que me mostrou o quanto é maravilhoso compartilhar o conhecimento; ao meu orientador do curso de Mestrado, Prof. Dr. Gabriel Hickel, um degrau imprescindível para a pesquisa.

Ao meu orientador e à minha co-orientadora deste curso de doutorado, Prof. Dr. Oli Dors e Profa. Dra. Angela Krabbe, respectivamente, dedico minha mais profunda gratidão pela transferência do conhecimento e atenção à pesquisa. A admiração é imensa. Neste momento de turbulências, a pesquisa possui um ingrediente a mais de habilidade.

Aos colegas do curso, aos funcionários da Universidade do Vale do Paraíba, aos demais professores da pós-graduação, enfim, a todos que contribuíram, de qualquer forma e em qualquer momento, para o meu aprimoramento profissional.

Por último, mas não menos importante, agradeço à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo financiamento deste curso de douto-

rado na modalidade taxa, sem o qual não seria possível a conclusão. Programas sociais como este são importantíssimos para a realização de projetos de pesquisa.

"Querer é poder"

(provérbio português repetido pelo meu pai durante toda sua vida)

★ 1930 † 2001

Resumo

Neste trabalho apresentamos uma calibração semi-empírica entre a metalicidade (Z) de Núcleos Ativos de Galáxias tipo Seyfert 2 e a razão de intensidade de linhas de emissão $N2 = \log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$. Esta calibração foi derivada utilizando um diagrama $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727$ versus $N2$ contendo dados observacionais e resultados de modelos de fotoionização construídos com o código CLOUDY. A amostra observacional consiste em 463 núcleos Seyfert 2 (redshift $z \lesssim 0.4$) obtidos do banco de dados do Sloan Digital Sky Survey DR7. A relação obtida $Z-N2$ é válida para o intervalo $0.3 \lesssim (Z/Z_{\odot}) \lesssim 2.0$ a qual corresponde $-0.7 \lesssim (N2) \lesssim 0.6$. Os efeitos da variação do parâmetro de ionização (U), densidade eletrônica e a inclinação da distribuição espectral de energia nas estimativas de Z são da ordem da incerteza produzida pelo erro observacional de $N2$. Este resultado indica a grande confiabilidade de nossa calibração $Z-N2$. Obtivemos uma relação entre U e a razão de linhas $[\text{O III}]/[\text{O II}]$, quase independente de outro parâmetro nebuloso.

Palavras-chave: galáxias: ativas - galáxias: abundâncias - galáxias: evolução - galáxias: núcleos - galáxias: formação - galáxias: ISM - galáxias: Seyfert - galáxias: índice $N2$

Abstract

We present a semi-empirical calibration between the metallicity (Z) of Seyfert 2 Active Galactic Nuclei and the $N2 = \log([\text{N II}]\lambda 6584 / \text{H}\alpha)$ emission-line intensity ratio. This calibration was derived through the $[\text{O III}]\lambda 5007 / [\text{O II}]\lambda 3727$ versus $N2$ diagram containing observational data and photoionization model results obtained with the Cloudy code. The observational sample consists of 463 confirmed Seyfert 2 nuclei (redshift $z \lesssim 0.4$) taken from the Sloan Digital Sky Survey DR7 dataset. The obtained Z - $N2$ relation is valid for the range $0.3 \lesssim (Z/Z_{\odot}) \lesssim 2.0$ which corresponds to $-0.7 \lesssim (N2) \lesssim 0.6$. The effects of varying the ionization parameter (U), electron density and the slope of the spectral energy distribution on the Z estimations are of the order of the uncertainty produced by the error measurements of $N2$. This result indicates the large reliability of our $Z - N2$ calibration. A relation between U and the $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ line ratio, almost independent of other nebular parameter, was obtained.

Keywords: galaxies: active – galaxies: abundances – galaxies: evolution – galaxies: nuclei – galaxies: formation – galaxies: ISM – galaxies: Seyfert – galaxies: index $N2$

Lista de ilustrações

Figura 1 – Comparação entre fluxo de radiação de um AGN Seyfert tipo-1 e de uma galáxia sem um núcleo ativo.	15
Figura 2 – Espectro composto de um AGN.	16
Figura 3 – Espectro típico de AGN Seyfert tipo-1 e tipo-2	20
Figura 4 – Esquema simplificado do Modelo Unificado.	22
Figura 5 – Exemplo de região de formação estelar próxima a um AGN obtida por Riffel, Storchi-Bergmann, Dors et al. (2009).	24
Figura 6 – Estimativa da abundância do oxigênio em relação a do hidrogênio	26
Figura 7 – Diagramas diagnóstico contendo a amostra de 463 objetos	34
Figura 8 – Valores da razão de abundância de $\log(N/O)$ versus $12+\log(O/H)$	37
Figura 9 – $\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 100 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -0.8$	40
Figura 10 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 500 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -0.8$	41
Figura 11 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 3000 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -0.8$	42
Figura 12 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 100 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.1$	43
Figura 13 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 500 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.1$	44
Figura 14 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 3000 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.1$	45
Figura 15 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 100 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.4$	46
Figura 16 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 500 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.4$	47
Figura 17 – $-\log(\lambda 5007/H\beta)$ vs. $(\lambda 6584/H\alpha)$ para $N_e = 3000 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.4$	48
Figura 18 – Metalicidade (Z/Z_\odot) vs. $N2$	50
Figura 19 – Logaritmo do parâmetro de ionização ($\log U$) versus $\log(O \text{ III} \lambda 5007/O \text{ II} \lambda 3727)$	51
Figura 20 – Diferença entre metalicidades derivadas por diferentes calibrações	58
Figura 21 – Comparação entre as relações (N/O) - (O/H) assumida em modelos de fotoionização por diferentes autores	59
Figura 22 – Logaritmo do parâmetro de ionização para a nossa amostra de objetos calculados a partir da calibração de Penston et al. (1990) versus os valores calculados a partir da calibração deste trabalho	60

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores dos coeficientes a e b resultantes do ajuste da Equação 3.1 aos pontos da Figura 18 considerando para diferentes parâmetros dos modelos. A última linha lista os coeficientes obtidos não discriminando os parâmetros dos modelos.	52
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

AGN	Activity Galaxy Nuclei
SMBH	Super Massive Black Hole
BPT	Baldwin, Phillips e Terlevich
BLR	Região de linhas largas (broad line region)
e.g.	Exempli gratia
FWHM	Largura à meia altura - (Full Width at Half Maximum)
NLR	Região de linhas estreitas (narrow line region)
N_e	Densidade eletrônica
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SSP	Stellar population synthesis code
z	<i>redshift</i>
Ω_m	Parâmetro de densidade
Ω_{vac}	Parâmetro de densidade
H_0	Parâmetro de Hubble
H	Hidrogênio
He	Hélio
O	Oxigênio
N	Nitrogênio

Lista de símbolos

α	Letra grega minúscula alfa
λ	Letra grega minúscula lâmbida
δ	Letra grega minúscula delta
γ	Letra grega minúscula gama
ν	Letra grega minúscula ni
Ω	Letra grega maiúscula ômega
\odot	Solar
Å	Angstrom
cm^3	centímetro cúbico
pc	parsec
Mpc	Megaparsec
K	Temperatura na escala Kelvin

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Um pouco de história	17
1.2	Galáxias Seyferts	18
1.3	Modelo Unificado	20
1.4	Diagrama BPT (Baldwin, Phillips & Terlevich)	23
1.5	Determinação de metalicidade em AGN	23
1.6	Métodos para determinar a metalicidade em AGN	27
1.6.1	Método Direto ou Método T_e	27
1.6.2	Método de linhas fortes	28
2	Metodologia	31
2.1	Amostra Observacional	31
2.2	Modelos de fotoionização	35
3	Resultados	39
4	Discussão	53
4.1	Storchi-Bergmann et al. (1998)	54
4.2	Castro et al. (2007)	55
4.3	Pérez-Montero et al.(2019)	56
4.4	Comparação entre estimativas	56
5	Conclusão	61
	Referências	62

1 Introdução

Núcleos Ativos de Galáxias (AGN, do inglês Active Galactic Nuclei) incluem objetos mais luminosos no Universo e apresentam linhas de emissão fortes, medidas com alto sinal ruído (S/N) em seus espectros. São fenômenos super energéticos localizados na região central da galáxia hospedeira. A metalicidade derivada a partir de suas linhas de emissão oferece uma ferramenta muito poderosa para entender a evolução de galáxias ao longo do tempo de Hubble. Entre os elementos pesados presentes no gás de AGNs e de nebulosas gasosas, o oxigênio é o elemento mais utilizado como traçador da metalicidade, uma vez que linhas de emissão (e.g. [O II] $\lambda\lambda$ 3726, 29; [O III] λ 5007) emitidas pelos íons mais abundantes (e.g. O⁺, O²⁺) deste elemento são medidas com alto S/N no espectro destes objetos.

Em uma visão geral, AGN consiste de um buraco negro de massa maior do que $10^6 M_{\odot}$ (SÁNCHEZ et al., 2017) cujo núcleo emite uma grande quantidade de radiação caracterizada por um espectro não térmico, i.e. não se assemelha ao espectro de um corpo negro como o espectro de estrelas. O espectro de uma galáxia normal também não se assemelha a um corpo negro. Cada estrela tem um espectro tipo corpo negro, mas o espectro de uma população estelar difere de um corpo negro.

AGNs são, em geral, muito luminosos, com luminosidade bolométrica da ordem de 10^{46} erg s⁻¹ ($\approx 10^{12} L_{\odot}$) (CONTINI, 2012). Estes objetos possuem um fluxo de radiação muito forte em praticamente todas as faixas espectrais quando comparado ao fluxo de núcleos de galáxias que possuem formação estelar. Na Figura 1 mostramos uma comparação entre o fluxo emitido por uma galáxia com um AGN tipo Seyfert 1, a galáxia NGC 3783, com o de uma galáxia que não contém um AGN (referida como normal galaxy). Podemos ver que o fluxo de radiação da galáxia contendo AGN é superior ao da galáxia normal em todos os comprimentos de onda considerados.

Existem diferentes tipos de AGN, dentre os quais podemos citar quasares, galáxias Seyfert (tipo-1 e tipo-2), LINER, Rádio Galáxias. Cada qual possui características diferentes. De uma forma resumida AGNs podem ter as características abaixo, mas nem todas estão presentes em todo AGN:

- Alta luminosidade (conforme mencionado acima), com um núcleo muito brilhante, se comparado ao núcleo de uma galáxia normal;
- Contínuo dominado por emissão não térmica;
- Variabilidade na emissão contínua e/ou em linhas de emissão em escalas de tempo relativamente curtas (dias/horas);

- Alto contraste de brilho entre o núcleo ativo e a galáxia hospedeira;
- Linhas de emissão intensas no ótico, muito largas em alguns casos, ou seja, presentes apenas nas linhas permitidas indicando que provêm de um gás com alta densidade.

O entendimento das propriedades de AGNs torna-se um ponto primordial para o estudo da formação e evolução das galáxias e do Universo, pois estes objetos possuem uma alta ocorrência e, qualquer teoria de formação de galáxias, deve considerar a presença de AGNs. Um exemplo de um espectro de AGN na faixa espectral do ultravioleta e do ótico é apresentado na Figura 2.

Figura 1 – Comparação entre a Distribuição Espectral de Energia (SED) da galáxia Seyfert 1 NGC 3783 com o de uma galáxia não ativa. (ALLOIN et al., 1995).

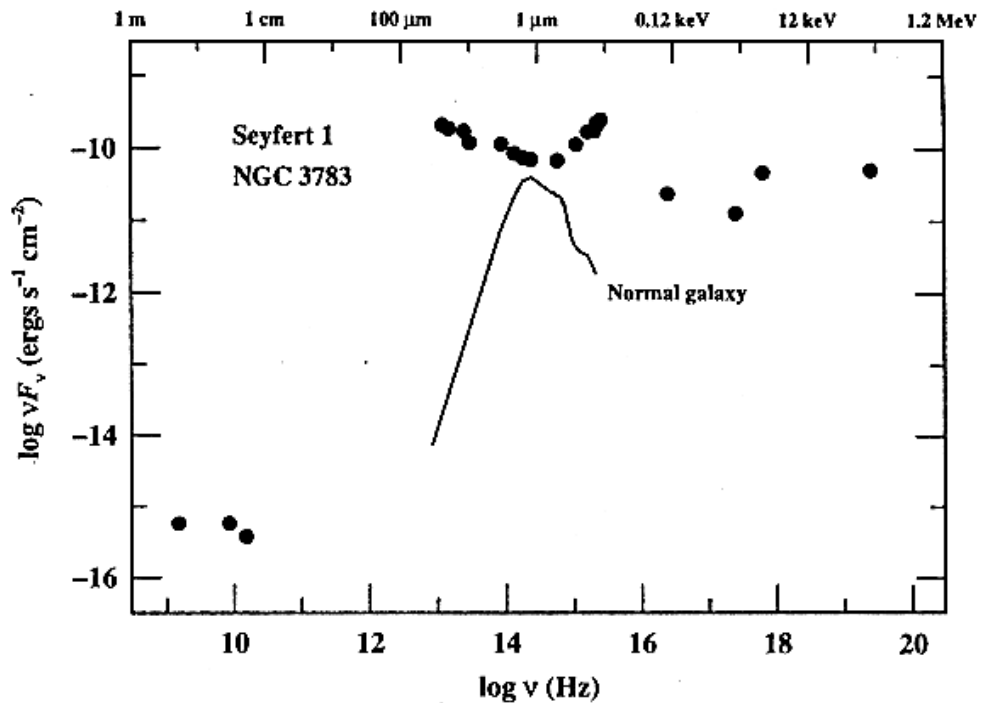
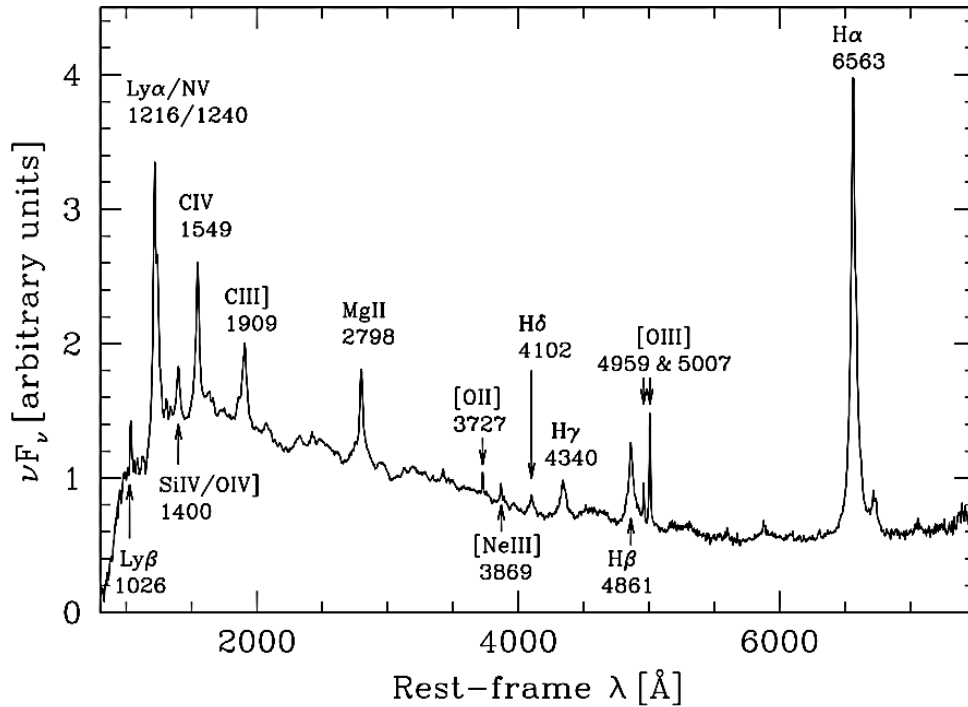


Figura 2 – Espectro composto de um AGN. O eixo y corresponde ao fluxo de radiação (unidades de νF) enquanto o eixo x corresponde ao comprimento de onda (em \AA).



Fonte: Francis et al. (1991)

De acordo com a teoria mais aceita, a emissão de radiação de um AGN é devido ao acréscimo de gás em um buraco negro supermassivo (SMBH, do inglês super massive black hole) e este gás, que provém do disco de acreção, é ionizado emitindo radiação (REES, 1984). Existe uma correlação observada entre a massa do SMBH e a massa da galáxia hospedeira. Esta é uma forte indicação que a formação de SMBH está conectada com a formação de galáxias (MCKERNAN; FORD; REYNOLDS, 2010; YANG et al., 2017).

É prevista a formação de buracos negros quando estrelas muito massivas colapsam no final de seu ciclo de vida. Este buraco negro formado pode continuar a crescer absorvendo massa do ambiente, como por exemplo absorvendo massa de outras estrelas ou se fundir com outros buracos negros. Existem estudos sobre a existência de buracos negros supermassivos no centro da maioria das galáxias. A seguir mencionamos a classificação de buracos negros quanto a sua massa:

1. Na fase final de estrelas de grande massa (massa superior a $\sim 15 M_{\odot}$), i.e. após a explosão de supernovas. Estes buracos negros são denominados buracos negros estelares.
2. No núcleo de aglomerados de estrelas, denominados buracos negros de massa intermediária.

3. Buracos negros supermassivos localizados no centro das galáxias, com massas de milhões a bilhões de vezes a massa do Sol, denominados SMBH.
4. Buracos negros primordiais que podem ter sido formados devido a pressões, temperaturas e densidades extremas nos primórdios do universo.

Um SMBH no centro de uma galáxia pode capturar matéria e gás de sua vizinhança emitindo radiação em praticamente todos os comprimentos de onda. Através da transformação de energia potencial gravitacional em energia cinética, este gás é acelerado em direção ao SMBH, o qual, possuindo momento angular, vai cair espiralando e formando um disco de acreção. Seguindo esta teoria, o disco de acreção terá gradientes de velocidade ao longo do raio, no sentido que, para raios menores temos gás com velocidades maiores e para raios maiores temos gás com velocidades menores. A diferenciação de velocidades e a viscosidade do gás acarreta a produção de atrito entre os discos concêntricos. É o atrito e esta viscosidade que produzem a perda de momento angular, permitindo que o gás espirale em direção ao Buraco Negro. A radiação observada por AGNs é chamada de não térmica pois não podemos representá-la por um espectro de corpo negro, como fazemos com a radiação estelar (radiação térmica).

O estudo desta radiação não térmica, em particular, da estimativa de metalicidade a partir de linhas estreitas de emissão observadas no espectro ótico de AGNs tipo Seyfert 2, é o tema principal deste trabalho.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: No capítulo 2 apresentamos um pouco da história sobre os primeiros estudos de AGNs, completando com Galáxias Seyfert, o modelo unificado e o diagrama BPT - Baldwin, Phillips e Terlevich (BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH, 1981), bem como a relação destes tópicos com o trabalho apresentado. Ainda neste capítulo mostramos como determinar a metalicidade em AGN utilizando alguns dos métodos disponíveis na literatura. No capítulo 3 apresentamos a metodologia utilizada para obter uma calibração semi-empírica entre Z e a razão de linhas $N2 = \log([\text{N II}]\lambda 6584 / \text{H}\alpha)$. No capítulo 4 apresentamos os resultados obtidos. O capítulo 5 mostra a discussão e o capítulo 6 mostra as conclusões dos resultados.

1.1 Um pouco de história

No século passado, E. A. Fath (FATH, 1909), após observar na faixa do ótico do espectro eletromagnético a galáxia NGC 1068, mostrou que ela possuía um espectro semelhante ao de uma nebulosa planetária, com seis linhas de emissão brilhantes que hoje conhecemos como as linhas proibidas $[\text{O II}]\lambda 3727$, $[\text{Ne III}]\lambda 3869$ e $[\text{O III}]\lambda 4959, \lambda 5007$, além de $\text{H}\alpha$ e $\text{H}\beta$. Entretanto, estas linhas possuíam como característica principal o fato de que eram mais alargadas, se fossem comparadas com as linhas de nebulosas planetárias.

Este fato chamou a atenção da comunidade científica da época, mas o autor não conseguiu explicar a causa deste alargamento.

Em observações de 1912 e 1917, V. M. Slipher ([SLIPHER, 1917](#)) conseguiu medir a velocidade radial desta mesma galáxia através do efeito Doppler de linhas de emissão referidas por N1, N2 e $H\alpha$, chegando a um valor aproximado de 1.120 km/s. Nesta época não se tinha conhecimento da origem destas linhas que compunham N1 e N2 e foram atribuídas ao elemento que na época era denominado Nebulium ([HUGGINS, 1864](#)). Posteriormente, em 1927, Ira Sprague Bowen ([BOWEN, 1927](#)) mostrou que estas linhas são emitidas por oxigênio ionizado duas vezes e correspondem às linhas $[O\ III]\lambda 4959, \lambda 5007$.

Ao longo do tempo outras galáxias com estas características foram sendo observadas, mas ainda não se tinha conhecimento da razão pela qual haviam linhas de emissão diferentes das observadas em nebulosas planetárias. Cerca de 20 anos mais tarde, Carl K. Seyfert ([SEYFERT, 1943](#)) publicou um artigo o qual apresentava 6 galáxias com estas mesmas características (NGC 1068, NGC 1275, NGC 3516, NGC 4051, NGC 4151 e NGC 7469), ou seja, linhas de emissão alargadas e com alta intensidade.

A denominação AGN foi utilizada pela primeira vez por Viktor Ambartsumyan em 1958, quando participou da Solvay Conference on Physics. Enquanto outros astrônomos explicavam objetos ativos (radio galáxias, Quasares, Galáxias Seyfert, LINERS) como sendo formados somente devido uma colisão acidental entre duas galáxias, Viktor Ambartsumyan foi o primeiro e único a mostrar convincentemente que no caso de radiogaláxias não se tem colisões, mas somente núcleos de galáxias com ejeções de matéria ([KHACHIKIAN, 1979](#)). Já em 1962, Viktor Ambartsumyan menciona na conclusão de seu artigo:

“Thus, the major processes in the life of large galaxies is determined by the activity of their nuclei.” ([AMBARTSUMYAN, 1962](#)).

A ideia sobre a atividade dos núcleos galácticos, a princípio, foi aceita com incredulidade e somente depois de muitos anos, devido às constatações baseadas em observações (descoberta de quasares, jatos em rádio-galáxias, etc) ganhou notoriedade e consideração. Atualmente o conceito de AGN é amplamente aceito.

1.2 Galáxias Seyferts

A classificação de núcleos de galáxias Seyfert depende da largura de seus perfis de linha de emissão. Sob este aspecto dois tipos são bem definidos: Seyfert tipo-1 e Seyfert tipo-2.

Um típico espectro óptico ($3000 < \lambda(\text{Å}) < 7000$) é mostrado na Figura 3, representando fluxos de radiação dos espectros para os dois tipos de galáxias: Seyfert tipo-1

(NGC 4151) e Seyfert tipo-2 (NGC 4941), comparadas com uma galáxia normal (NGC 3368), ou seja, sem atividade em seu núcleo. No espectro da galáxia normal, há uma variedade de linhas de absorção (proveniente de estrelas) e linhas de emissão (proveniente de nuvens de gás com alta temperatura). O espectro da AGN Seyfert Tipo-1 exibe linhas de emissão permitidas mais largas ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$), enquanto que o espectro da AGN Seyfert Tipo-2 exibe apenas linhas estreitas. Verificamos a presença de linhas de emissão muito fortes e linhas de absorção muito fracas.

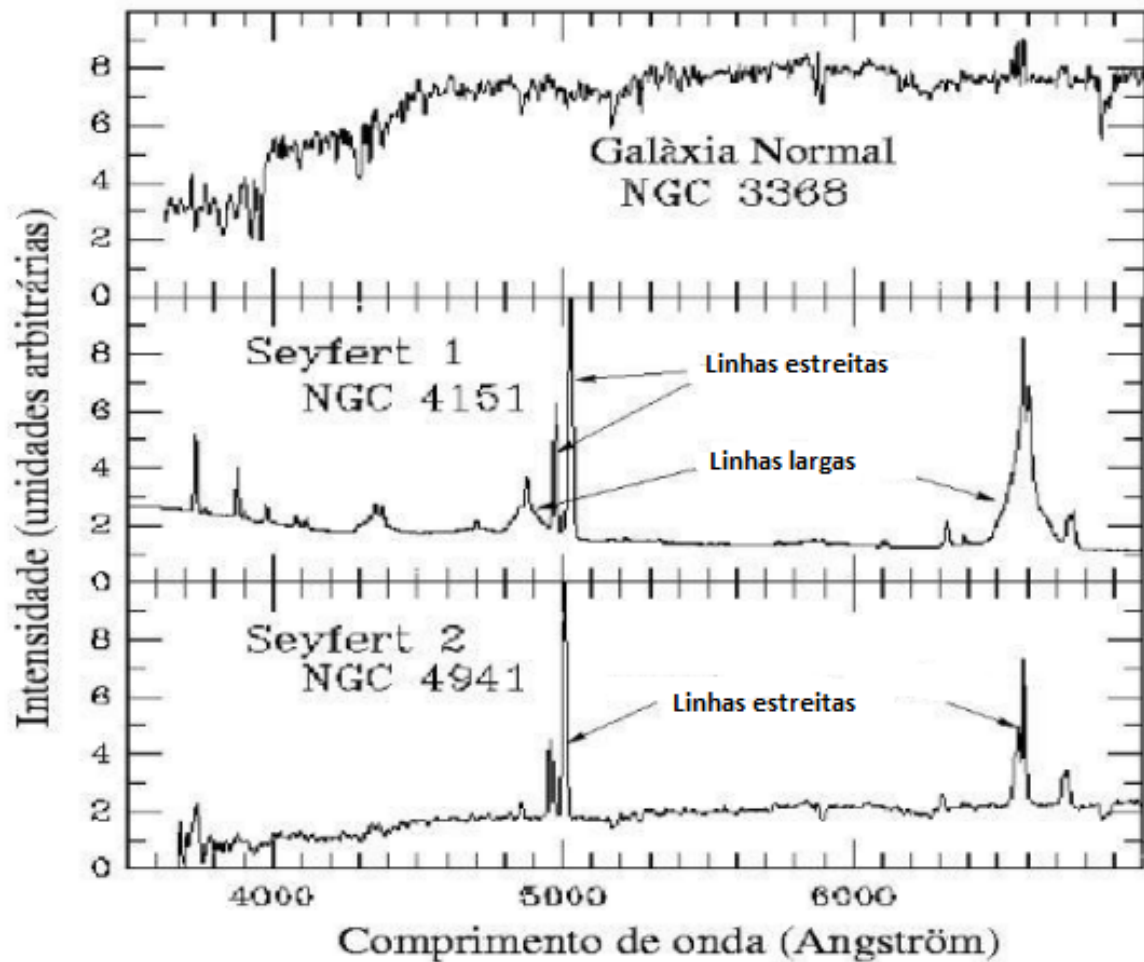
Facilmente identificamos a galáxia Seyfert tipo-1 que apresenta tanto a componente larga quanto a estreita em suas linhas de emissão. Estas componentes largas estão associadas às linhas da série de Balmer (Johann Balmer, 1885) do hidrogênio, $H\alpha$ ($\lambda 6563$), $H\beta$ ($\lambda 4858$), $H\gamma$ ($\lambda 4340$) e $H\delta$ ($\lambda 4101$), com largura de FWHM (largura à meia altura - Full Width at Half Maximum) da ordem de 1000 – 5000 km/s podendo chegar a valores maiores. As linhas proibidas com sua componente estreita (e.g. $[O II]\lambda 3727$, $[Ne III]\lambda 3869$) possuem largura típica de FWHM ≈ 500 km/s. Com relação à Seyfert tipo-2 encontramos linhas da série de Balmer do hidrogênio mais estreitas, com largura de FWHM ≈ 500 km s^{-1} . Existem ainda algumas classificações intermediárias entre as galáxias Seyfert tipo-1 e tipo-2 onde está relacionada, entre outras, com a largura das linhas $H\beta$ (e.g. Seyfert tipo-1.9).

Como reportado anteriormente, o disco de acreção possui gradientes de velocidade, ou seja, a medida que o raio do disco diminui a velocidade de rotação do gás aumenta.

A região de linhas largas (BLR) é responsável pela emissão de linhas largas que podem ser vistas no espectro óptico de AGN tipo 1. Esta região é fotoionizada pelo contínuo central.

Logo, propriedades físicas derivadas a partir de linhas largas correspondem a de regiões próximas ao buraco negro e, de forma similar, as propriedades derivadas utilizando linhas estreitas correspondem a de regiões mais afastadas do buraco negro. O modelo (cenário) unificado nos mostra que as duas modalidades estão presentes no mesmo objeto, depende do ângulo que esteja sendo observado.

Figura 3 – Espectros de galáxias Seyferts 1 e 2 em comparação com o espectro de uma galáxia normal. O AGN Seyfert Tipo-1 exhibe linhas de emissão mais largas da série de Balmer do hidrogênio ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ e $H\delta$), enquanto o AGN Tipo-2 exhibe apenas linhas estreitas. (<https://sites.uni.edu/morgans/astro/course/Notes/section3/new13.html>).



1.3 Modelo Unificado

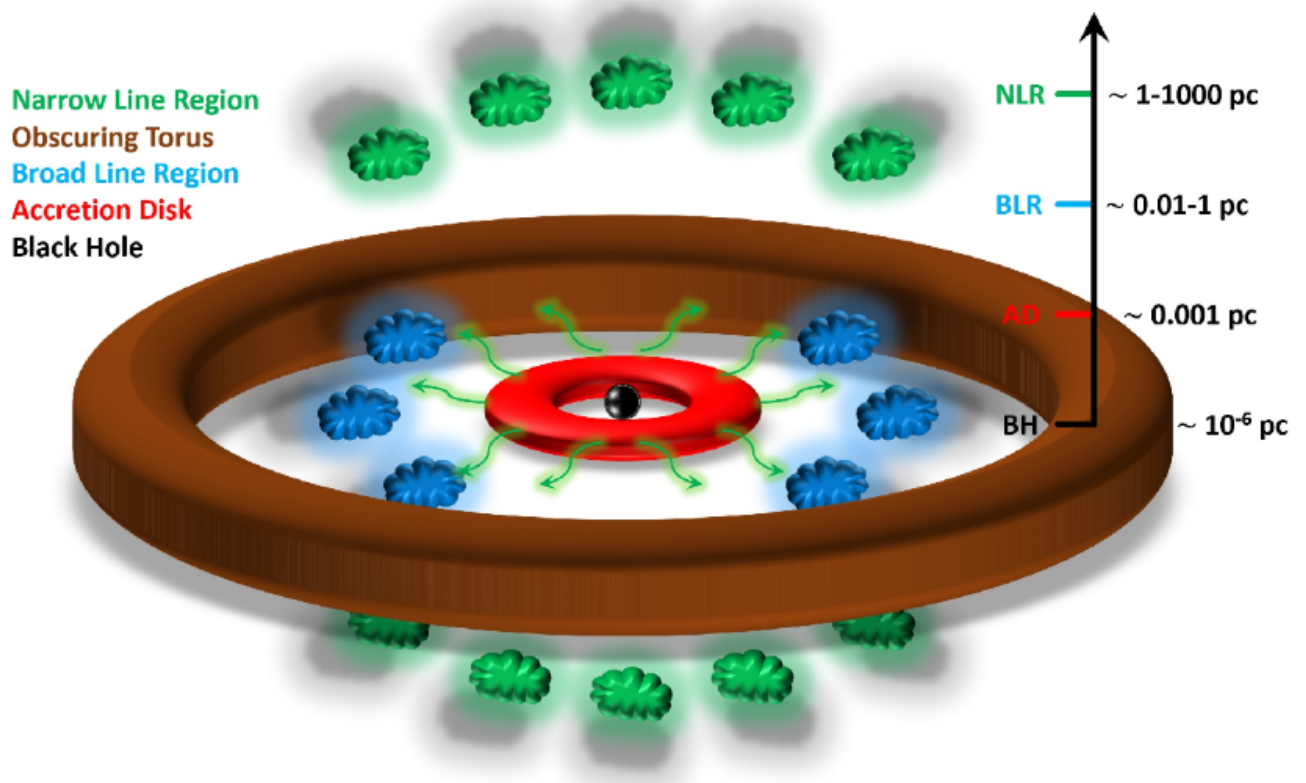
O Modelo Unificado para AGNs pressupõe que a inclinação de um AGN em relação a linha de visada é característica principal para classificação deste tipo de objeto. Antonucci (1993) propôs que o modelo unificado pode explicar que ambos os tipos de galáxias ativas são intrinsecamente iguais mesmo apresentando diferenças em seus espectros, como a largura das linhas.

Neste modelo unificado observamos posicionado no centro um SMBH e em torno do qual a existência de um disco de acreção. Próximo a este mecanismo central encontramos uma região de linhas largas (broad line region ou BLR) localizada mais próxima a um raio menor do disco de acreção (aproximadamente de 0,01-1 pc conforme figura 4). Esta

proximidade com o mecanismo central do sistema faz com que a região possua movimento com velocidades maiores. A região de linhas estreitas (narrow line region ou NLR) localiza-se mais próxima do raio maior do disco de acreção (aproximadamente de 1-1000 pc, conforme figura 4) e possui movimento com velocidades menores. O toróide de gás em uma galáxia ativa tem um papel importante neste modelo unificado. Localizado entre as regiões BLR e NLR, é capaz de obscurecer parte da emissão na linha de visada quando observada em determinadas posições.

A Figura 4 apresenta um esquema simplificado do Modelo Unificado. O material do disco de acreção (em vermelho) cai no SMBH (em preto), produzindo fótons energéticos (setas verdes). Essa radiação se propaga para a região de linhas largas (BLR - em azul) e região de linhas estreitas (NLR - em verde) onde é reprocessada. Neste modelo, quando a observação é feita diretamente na direção do centro, é vista a região de linhas largas (BLR) e um objeto é classificado como Seyfert tipo-1. Quando a linha de visada intercepta o anel de poeira (toróide) que obscurece o motor central, a região de linhas largas é ocultada, o objeto é classificado como Seyfert tipo-2, sendo observado somente a região de linhas estreitas (NLR). O gás emissor de Seyfert tipo-1 (BLR) é altamente perturbado, sendo que a ionização deste é devida a fotoionização que é o mecanismo principal e também por choques de gás, como mecanismo secundário, com velocidades maiores que $\approx 1.000 \text{ km s}^{-1}$. O gás emissor de Seyfert tipo-2 (NLR) não é muito perturbado, sendo que o choque de gás ou é inexistente ou ocorre com frequências baixas, com velocidades menores que $\approx 1.000 \text{ km s}^{-1}$.

Figura 4 – O diagrama abaixo apresenta uma visão simplificada do modelo unificado da estrutura ativa de uma galáxia em escala logarítmica para um SMBH. O material do disco de acreção (em vermelho) cai no SMBH (em preto), produzindo fótons energéticos (setas verdes). Essa radiação se propaga para a região de linhas largas - BLR (em azul) e região de linhas estreitas NLR (em verde) onde é reprocessada. Neste modelo, quando a observação é feita diretamente na direção do centro, é vista a região de linhas largas (BLR), e um objeto é classificado por Seyfert tipo-1. Quando a linha de visada intercepta o anel de poeira (toróide) que obscurece o motor central, a região de linhas largas é ocultada e o objeto é classificado como Seyfert tipo-2, sendo observado somente a região de linhas estreitas (NLR).



Fonte: Revalski et al. (2018)

1.4 Diagrama BPT (Baldwin, Phillips & Terlevich)

Frequentemente, quando observamos um núcleo ou uma região de uma galáxia, necessitamos saber qual o tipo de fonte de ionização deste objeto, por exemplo, se a fonte é de origem estelar (estrelas do tipo O ou B), um AGN ou um LINER.

Este tipo de classificação pode ser obtida analisando o valor da razão de intensidade de algumas linhas de emissão presentes no espectro do objeto em questão. Esta metodologia foi proposta por Baldwin, Phillips & Terlevich ([BALDWIN; PHILLIPS; TERLEVICH, 1981](#)), que classificaram as fontes de ionização de uma amostra de objetos como:

- a) Fotoionização por estrelas do tipo O ou B (fonte térmica);
- b) Fotoionização por uma lei de potência (AGN, fonte não térmica);
- c) Nebulosas planetárias.

Diagramas de diagnóstico baseados em razões de linhas de emissão observadas no ótico são conhecidos por diagramas BPT e são muito utilizados na taxonomia de objetos emissores de linhas. Em uma de suas versões, consiste na intensidade das razões de linhas de emissão $[O\ III]\lambda 5007/H\beta$ versus $[N\ II]\lambda 6583/H\alpha$. Também existem algumas variações do diagrama BPT que utilizam as linhas $[S\ II](\lambda 6717 + \lambda 6731)/H\alpha$ e $[O\ I]\lambda 6300/H\alpha$. Razões de linhas diferentes podem depender de diferentes parâmetros nebulares como, por exemplo, metalicidade, densidade eletrônica, grau de ionização do gás etc (ver [Feltre, Charlot e Gutkin \(2016\)](#)).

O uso dos diagramas BPT é fundamental no estudo de metalicidade e abundâncias químicas de AGNs e regiões de formação estelar uma vez mas antes de classificar estes parâmetros, devemos conhecer sua fonte ionizante. Ao longo dos anos, diversos autores têm propostos diferentes critérios de classificação baseados em diagramas BPT. Podemos citar os critérios baseados em resultados de modelos de fotoionização propostos por [Kewley et al. \(2006\)](#) (classificação teórica) ou baseados somente em dados observacionais, como proposto por [Kauffmann et al. \(2003\)](#) (classificação empírica).

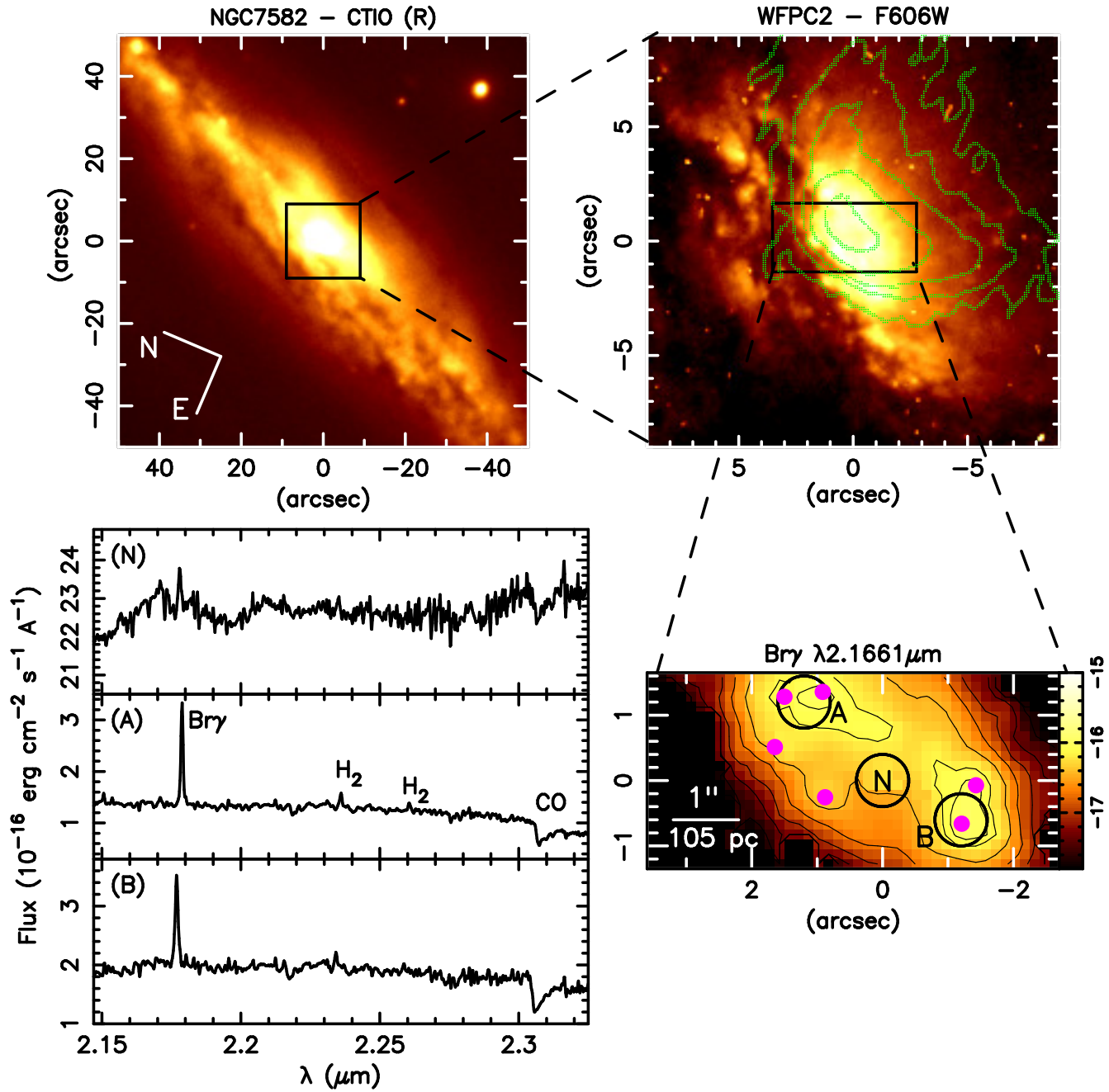
1.5 Determinação de metalicidade em AGN

A metalicidade (Z) de um gás é definida pela soma da abundância por número (N) de elementos (X) com massa atômica maior que a do o hélio em relação a abundância do hidrogênio, ou seja,

$$Z = \frac{N(O) + N(N) + N(S) + N(Ar) + \dots}{N(H)} = \sum_i \frac{N(X^i)}{N(H)}, \quad (1.1)$$

Considerando N como a abundância por número de massa atômica, sendo que a soma sobre o índice i representa a soma de todos os metais presentes no gás.

Figura 5 – Exemplo de região de formação estelar próxima a um AGN obtida por Riffel et al. (2009). Painel superior esquerdo: Imagem em larga escala da galáxia NGC 7582. Painel superior direito: Imagem obtida com o Hubble Space Telescope da região central de NGC 7582. Painel inferior direito: Mapa de fluxo em Br γ obtido com o Gemini. A localização de duas regiões H II é indicada por A e B e a do AGN por N. Painel inferior esquerdo: Espectro dos objetos A, B e C.



Fonte: Riffel et al. (2009)

Obviamente, em AGNs não ocorre síntese de elementos pesados e a sua presença é devido à acreção de gás enriquecido proveniente de regiões de formação estelar próximas ao AGN. Por exemplo, [Riffel et al. \(2009\)](#), utilizando espectroscopia de campo integral (IFU), encontraram regiões de formação estelar localizadas a ~ 190 pc do núcleo Seyfert da galáxia NGC 7582 (ver Figura 5).

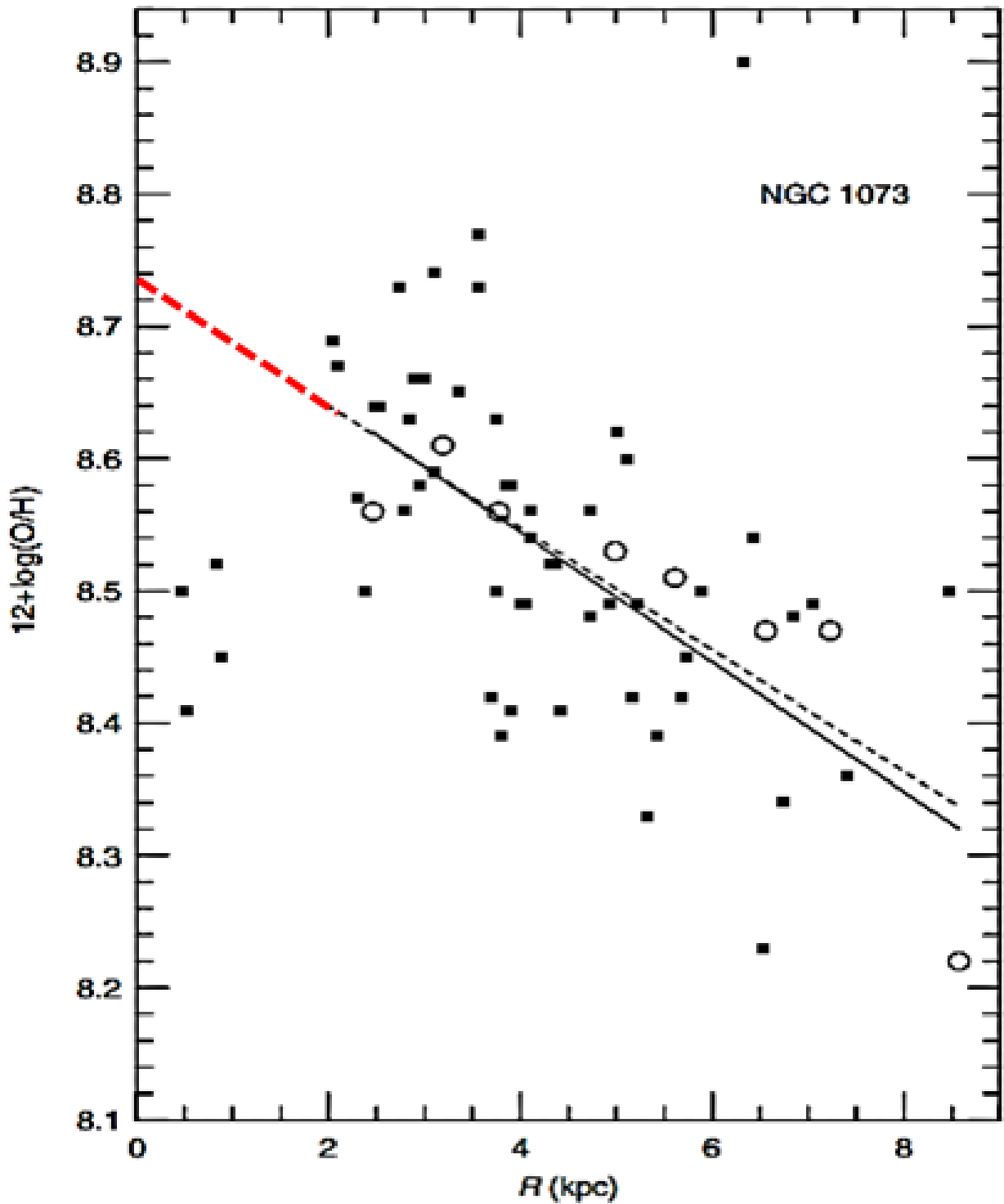
Segundo o cenário de formação de galáxias “inside-out” ([MOLLÁ; DÍAZ, 2005](#)), a formação estelar ocorre primeiramente nas partes centrais das galáxias e, à medida que esta evolui, a formação estelar começa a ocorrer em maiores distâncias galactocêntricas. Assim, o meio interestelar nas partes centrais é mais enriquecido que nas partes externas da galáxia em uma dada escala de tempo e, conseqüentemente, a metalicidade no centro é maior que a das partes externas. Logo, devemos encontrar um gradiente de metalicidade em galáxias espirais o que, de fato, ocorre. Por exemplo, [Dors e Copetti \(2005\)](#) utilizaram modelos de fotoionização para reproduzir intensidades de linhas de emissão de regiões H II situadas ao longo do disco de 4 galáxias espirais, M 101, NGC 1097, NGC 1365 e NGC 1073. Estes autores encontraram gradientes de abundância bem definidos nestes objetos. Na Figura 6, obtida de [Dors e Copetti \(2005\)](#), podemos ver o gradiente na abundância de oxigênio na galáxia NGC 1073. Estes autores encontraram um gradiente em NGC 1073 representado por:

$$12 + \log\left(\frac{\text{O}}{\text{H}}\right) = (-0.048 \pm 0.012) R(\text{kpc}) + (8.74 \pm 0.06). \quad (1.2)$$

Desta forma, podemos extrapolar este gradiente a regiões centrais ($R = 0$ kpc) de galáxias espirais e obter, indiretamente, uma estimativa da abundância do oxigênio em AGNs ou núcleos com formação estelar. No caso de NGC 1073, adotando a abundância solar $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\odot} = 8.69$ e o gradiente encontrado por [Dors e Copetti \(2005\)](#), encontramos uma metalicidade para o núcleo da ordem de ($Z/Z_{\odot} \sim 1.3$). Se a atividade não for provocada por acréscimo de uma galáxia anã, por exemplo, sempre devemos esperar valores de metalicidade altos em AGNs, similares ou superiores aos de regiões H II localizadas a pequenas distâncias galactocêntricas. De fato, [Dors et al. \(2008\)](#) encontraram metalicidades da ordem de ou um pouco superior a metalicidade solar em regiões de formação circunucleares nas galáxias Seyfert NGC 6951 e NGC 1097.

Apresentamos a seguir alguns métodos utilizados para derivar a metalicidade do gás em AGNs.

Figura 6 – Estimativa da abundância do oxigênio em relação a do hidrogênio (em unidades de $12+\log(\text{O}/\text{H})$) de regiões H II em NGC 1073 versus a distância galactocêntrica R (em unidades de kpc). Pontos significam estimativas de abundância. As linhas tracejada e contínua, em preto, são utilizadas para indicar os ajustes sobre os pontos, conforme indicado no texto. A linha tracejada na cor vermelha é utilizada para indicar a extrapolação para $R = 0$ (Kpc) (DORS; COPETTI, 2005).



Fonte: Dors e Copetti (2005)

1.6 Métodos para determinar a metalicidade em AGN

Anteriormente vimos que a metalicidade Z é definida como a soma da abundância de todos os elementos em relação a do hidrogênio. Na maior parte dos casos, não podemos estimar a abundância de todos estes elementos individualmente e utilizamos apenas um para estimar Z , geralmente o oxigênio, ou seja, fazemos:

$$Z \sim \frac{N(\text{O})}{N(\text{H})}. \quad (1.3)$$

O uso da abundância do oxigênio em relação a abundância do hidrogênio ser utilizado como traçador da metalicidade é devido a este elemento ser o mais abundante em AGNs e regiões H II e seus íons mais abundantes (i.e. O^+ , O^{2+}) possuírem linhas de emissão fortes, geralmente medidas com alta razão sinal ruído no espectro ótico, e.g. [O II]3727 e [O III]5007. Embora íons com mais alto estágio de ionização possam estar presentes, i.e. O^{3+} , a sua abundância em AGNs é inferior a 20% da abundância total de O, como mostrado por [Dors et al. \(2020\)](#). No que segue, apresentamos dois métodos que podemos usar para estimar a metalicidade.

1.6.1 Método Direto ou Método T_e

Este método consiste em calcularmos a abundância de um dado íon a partir da intensidade de uma linha de emissão deste em relação a uma dada linha do hidrogênio, geralmente $\text{H}\beta$, e na determinação da temperatura (T_e) e densidade (N_e) eletrônica do gás.

Podemos determinar a T_e utilizando linhas de emissão, de um mesmo íon, formadas em transições radiativas com uma grande diferença de energia de excitação. As razões de linhas mais utilizadas são as do íon O^{2+} :

$$R_{O3} = \frac{[\text{O III}](\lambda 4959 + \lambda 5007)}{[\text{O III}]\lambda 4363} \quad (1.4)$$

Uma vez medida a razão R_{O3} , a temperatura pode ser calculada por (ver [Hagele et al. \(2008\)](#)):

$$t_3 = 0.8254 - 0.0002415R_{O3} + \frac{47.77}{R_{O3}}, \quad (1.5)$$

sendo t_3 em unidades de 10^4 K. Esta temperatura representa a temperatura dos elétrons de uma região do gás onde se encontra a maior quantidade (abundância) do íon O^{2+} . Após conhecer t_3 , podemos calcular $N(\text{O}^{2+})/N(\text{H}^+)$ por:

$$12 + \log\left(\frac{\text{O}^{+2}}{\text{H}^+}\right) = \log\left(\frac{(\lambda\lambda 4959 + 5007)}{(\text{H}\beta)}\right) + 6.144 + \frac{1.251}{t_3} - 0.55 \log t_3 \quad (1.6)$$

O cálculo da temperatura do gás, onde se encontra a maior quantidade (abundância) do íon O^+ , pode ser feito para AGN, utilizando a expressão proposta por Dors et al. (2020b):

$$t_2 = (a \times t_3^3) + (b \times t_3^2) + (c \times t_3) + d, \quad (1.7)$$

sendo $a = 0.17 \pm 0.04$, $b = -1.07 \pm 0.22$, $c = 2.07 \pm 0.32$ and $d = -0.33 \pm 0.15$.

A abundância $\text{N}(\text{O}^+)/\text{N}(\text{H}^+)$ pode ser calculada por

$$12 + \log\left(\frac{\text{O}^+}{\text{H}^+}\right) = \log\left(\frac{(\lambda 3727)}{(\text{H}\beta)}\right) + 5.887 + \frac{1.641}{t_2} - 0.44 \log t_2 + \log(1 + 2.3n_e), \quad (1.8)$$

sendo n_e a densidade eletrônica N_e em unidades de $10\,000 \text{ cm}^{-3}$.

O oxigênio é o elemento mais amplamente utilizado para este propósito por ser sensível à temperatura e também porque as linhas de emissão proeminentes de seus principais estágios estão presentes nos espectros ópticos. Nem todos os estágios iônicos dos outros elementos (por exemplo N, S, Ne e Ar) são observados nos espectros ópticos. Desta forma, só podemos calcular as abundâncias totais usando o fator de correção de ionização (ICF) proposto por Peimbert e Costero (1969).

A densidade eletrônica média pode ser determinada a partir de medidas de duas linhas de emissão proveniente de um mesmo íon emitido, por níveis com aproximadamente a mesma energia de excitação. Se dois níveis tem probabilidade de transição radiativas distintas, a população relativa dos níveis depende somente da densidade eletrônica. Pode ser derivada a partir das razões de linhas: $[\text{O II}]\lambda 3726/\lambda 3729$ e $[\text{S II}]\lambda 6716/\lambda 6731$.

A metalicidade, escalonada pela abundância total do oxigênio em relação a do hidrogênio, com boa aproximação, pode ser calculada por

$$Z \equiv \frac{\text{N}(\text{O})}{\text{N}(\text{H})} \approx \frac{\text{N}(\text{O}^+)}{\text{N}(\text{H}^+)} + \frac{\text{N}(\text{O}^{2+})}{\text{N}(\text{H}^+)}. \quad (1.9)$$

1.6.2 Método de linhas fortes

Em geral, a linha $[\text{O III}]\lambda 4363$, assim como outras linhas sensíveis a T_e (e.g. $[\text{S III}]\lambda 6312$, $[\text{N II}]\lambda 5755$) são fracas (aproximadamente 100 vezes mais fracas que $\text{H}\beta$) ou não são medidas em espectros de regiões H II e AGNs. Uma dificuldade adicional é que $[\text{O III}]\lambda 4363$ pode estar sobreposta a linha $\text{H}\gamma$, exigindo uma alta resolução espectral para

ser medida. Desta forma, para a maioria dos casos, a metalicidade não pode ser calculada pelo Método T_e . Como uma alternativa, a comunidade científica desenvolveu métodos onde são utilizados apenas razão de linhas fortes (por exemplo as linhas [O II] λ 3727, [O III] λ 4959, λ 5007), facilmente observadas nos espectros óticos. Este método é chamado “Método de linhas fortes”.

O primeiro a propor a utilização deste método foi [Pagel et al. \(1979\)](#). Estes autores propuseram uma calibração entre o índice

$$R_{23} = \frac{[\text{OII}]\lambda 3727 + [\text{OIII}]\lambda 4959 + \lambda 5007}{\text{H}\beta} \quad (1.10)$$

e a abundância total do oxigênio (O/H) que, como vimos anteriormente, é um indicador da metalicidade. A ideia é simples, das Equações 1.6 e 1.8 temos que as razões

$$\frac{[\text{OIII}]\lambda 4959, \lambda 5007}{\text{H}\beta} \sim \frac{\text{N}(\text{O}^{2+})}{\text{N}(\text{H}^+)} \quad (1.11)$$

e

$$\frac{[\text{OII}]\lambda 3727}{\text{H}\beta} \sim \frac{\text{N}(\text{O}^+)}{\text{N}(\text{H}^+)}. \quad (1.12)$$

Logo:

$$R_{23} \sim \frac{\text{N}(\text{O})}{\text{N}(\text{H})} \sim Z. \quad (1.13)$$

O trabalho de [Pagel et al. \(1979\)](#) foi aperfeiçoado por alguns outros autores como [Skillman, Kennicutt e Hodge \(1989\)](#), [McGaugh \(1991\)](#) e [Pilyugin \(2000\)](#), mas pode ser somente aplicado para estudos de regiões de formação estelar. Algumas outras razões de linhas foram introduzidas por alguns autores, dentre eles [Edmunds e Pagel \(1984\)](#), [Pettini e Pagel \(2004\)](#), [Stasińska et al. \(2006\)](#), entre outros.

A primeira calibração entre linhas fortes e a metalicidade para AGNs foi proposta por [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#) que utilizaram em seu trabalho linhas de emissão observadas no ótico. Estes autores construíram uma grade de modelos de fotoionização utilizando o código CLOUDY ([FERLAND et al., 2013](#)), e propuseram uma calibração entre Z e as razões de linhas $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\beta$ e $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ como também $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\beta$ e $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727$. Nestas calibrações, a $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\beta$ é mais dependente da metalicidade, como proposto por [Storchi-Bergmann, Calzetti e Kinney \(1994\)](#), e as outras razões ao grau de ionização do gás.

O uso de razões de linhas não emitidas pelo oxigênio como indicadores de metalicidade, como sugerido por [Storchi-Bergmann, Calzetti e Kinney \(1994\)](#), é baseado na seguinte suposição. Uma vez que um elemento tem origem secundária, ou seja, sua produção na síntese estelar depende da abundância de oxigênio (ver [Vila-Costas e Edmunds](#)

(1993)), linhas de emissão deste elemento dependem de O/H. No caso do nitrogênio e carbono, temos para o regime $Z \gtrsim 0.2 Z_{\odot}$,

$$\frac{N(N)}{N(H)} \approx \left(\frac{N(O)}{N(H)}\right)^2 \approx Z^2 \quad (1.14)$$

e

$$\frac{N(C)}{N(H)} \approx \left(\frac{N(O)}{N(H)}\right)^2 \approx Z^2. \quad (1.15)$$

Desta forma, linhas emitidas pelo nitrogênio e carbono podem ser utilizadas para estimar a metalicidade.

Após trabalho pioneiro de [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#), temos apenas as calibrações propostas por [Dors et al. \(2014, 2019\)](#) e [Castro et al. \(2017\)](#) que utilizaram linhas de emissão estreitas observadas no ultravioleta e no ótico, respectivamente.

2 Metodologia

No presente estudo, propomos uma calibração semi-empírica entre a metalicidade Z de regiões de NLRs de núcleos Seyfert 2 e a razão de linhas $N2 = \log([\text{N II}]\lambda 6584 / \text{H}\alpha)$. Com esse objetivo, intensidades de linhas observacionais de galáxias Seyfer tipo-2, obtidas do Sloan Digital Sky Survey DR7, foram comparadas com intensidades previstas por modelos de fotoionização, construídas com o código Cloudy. Uma vez que os modelos reproduzem os dados observacionais, foi possível para cada objeto da amostra, obter valores de Z e do valor observacional de $N2$. Por fim, utilizando esses pares de pontos (Z , $N2$), obtivemos uma calibração. Nas seções subseqüentes a metodologia adotada é apresentada.

2.1 Amostra Observacional

A amostra observacional foi obtida por [Dors et al. \(2020\)](#) e é descrita abaixo.

[Dors et al. \(2020\)](#) utilizaram dados do Sloan Digital Sky Survey- SDSS DR7 ([YORK et al., 2000](#)), cuja medidas das linhas foram disponibilizados pelo grupo MPA/JHU. O procedimento de medição das linhas é descrito em detalhes em [Kauffmann et al. \(2003\)](#) e [Kauffmann Tremonti et al. \(2004\)](#). As intensidades das linhas disponibilizadas pelo grupo MPA/JHU são corrigidas por avermelhamento galáctico usando a metodologia apresentada em [O'Donnell \(1994\)](#).

Na base de dados SDSS-DR7, existem 927.552 objetos com razão sinal/ruído (S/N) maior que 2 e redshift $z < 0,7$, no qual 778.695 objetos têm estimativa de massa estelar. Com o objetivo de manter a consistência de nossa análise com trabalhos anteriores, por exemplo, [Dors et al. \(2015\)](#), [Pérez-Montero et al. \(2019\)](#), foram selecionados apenas os objetos que possuem, pelo menos, as seguintes linhas de emissão medidas: $[\text{O II}]\lambda 3727$, $\text{H}\beta$, $[\text{O III}]\lambda 5007$, $[\text{O I}]\lambda 6300$, $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6584$ e $[\text{S II}]\lambda \lambda 6717,31$. Ao adotar esse procedimento, a amostra foi reduzida para 538.878 objetos, principalmente devido à exigência de possuir a linha de emissão $[\text{O II}]\lambda 3727$ medida.

Posteriormente, para classificar objetos como AGN e como regiões de formação estelar, [Dors et al. \(2020\)](#) utilizaram diagramas padrão BPT. Os critérios propostos por [Kewley et al. \(2001\)](#) e [Pérez-Montero et al. \(2013\)](#), que consideram que AGNs são objetos que satisfazem:

$$\log([\text{O III}]\lambda 5007 / \text{H}\beta) > \frac{0.61}{\log([\text{N II}]\lambda 6584 / \text{H}\alpha) - 0.47} + 1.19, \quad (2.1)$$

$$\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > \frac{0.72}{\log([\text{S II}]\lambda\lambda 6717 + 31/\text{H}\alpha) - 0.32} + 1.30, \quad (2.2)$$

$$\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) > \frac{0.73}{\log([\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha) + 0.59} + 1.33, \quad (2.3)$$

e

$$\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha) > -1.05 \times \log([\text{S II}]\lambda\lambda 6717 + 31/\text{H}\alpha). \quad (2.4)$$

Os objetos "compostos", conforme definido em [Kewley et al. \(2006\)](#), não foram incluídos na amostra. Foi aplicado o critério proposto por [Kewley et al. \(2006\)](#) para a amostra selecionada com o objetivo de separar objetos LINER (região de linha de emissão nuclear de baixa ionização). O critério estabelece que objetos com

$$\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) < 1.30 + 1.18 \times \log([\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha) \quad (2.5)$$

e

$$\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta) < 0.76 + 1.89 \times \log([\text{S II}]\lambda\lambda 6717 + 31/\text{H}\alpha) \quad (2.6)$$

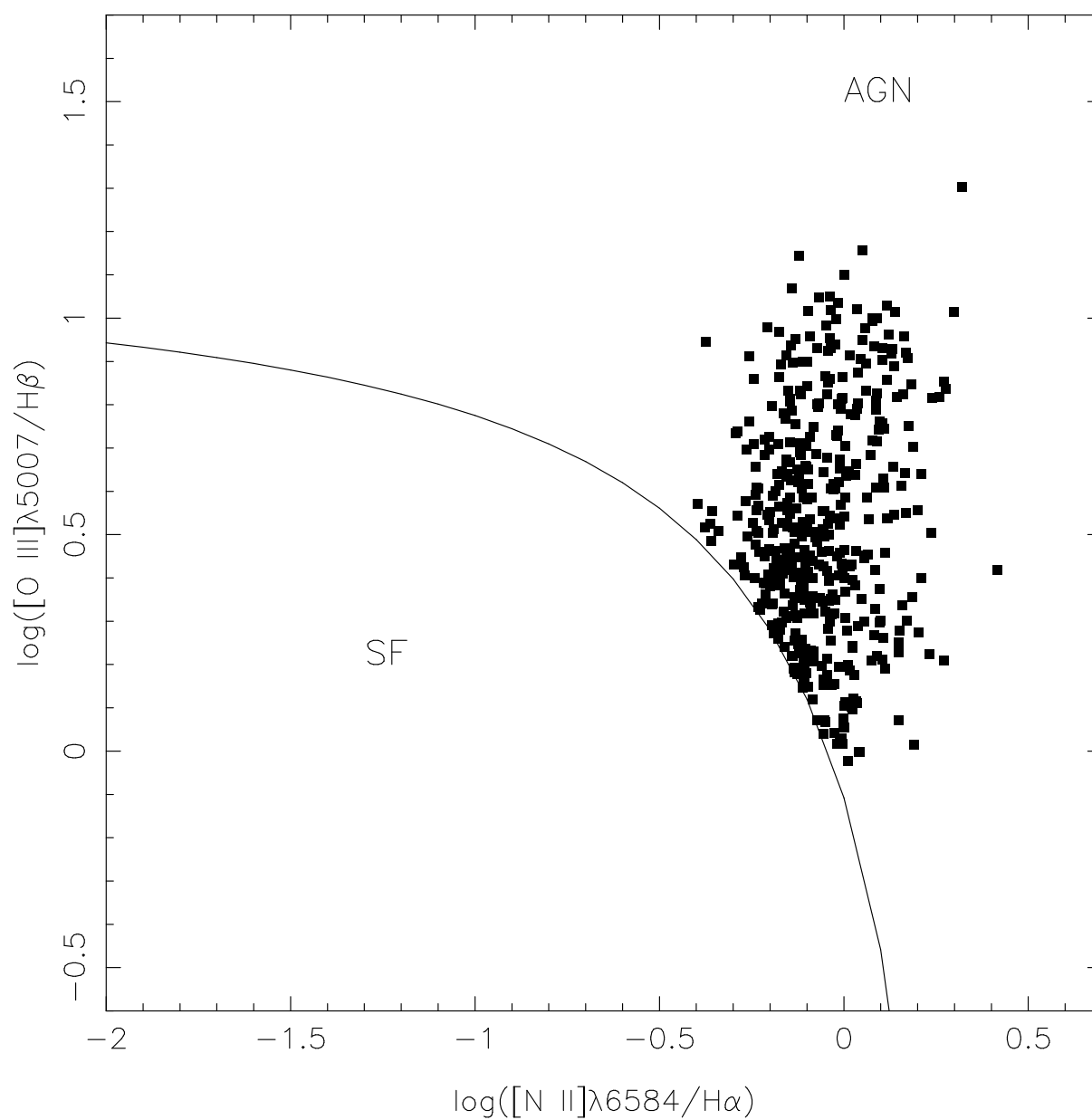
são candidatos a objetos como AGN (incluindo, por exemplo, Seyfert tipo-1, Seyfert tipo-2, quasares, objetos como regiões H II com ventos e choques muito fortes). Caso contrário, eles são candidatos a LINERs.

Os critérios de classificação para separar objetos de acordo com seus principais mecanismos de ionização apresentados anteriormente e baseados nos diagramas BPT são definidos para objetos no universo local ($z \approx 0$). No entanto, [Kewley et al. \(2013\)](#) mostraram que as linhas de demarcação em diagramas diagnósticos mudam em função do tempo cósmico, pois condições do meio interestelar são mais extremas e espera-se radiação ionizante mais intensa de aglomerados estelares (fonte ionizante de regiões de formação estelar) em altos *redshifts* do que os de galáxias no universo local. No entanto, como apontado por esses autores, as propriedades das galáxias praticamente não mudam para $z < 1$. O valor máximo do *redshift* dos objetos em nossa amostra é $\sim 0,37$. Portanto, a evolução cósmica não influencia nossa classificação.

Para os objetos selecionados, todos os fluxos das linhas de emissão foram divididos pelo correspondente fluxo de H β . Após os procedimentos apresentados acima, foram compilados do NED/IPAC3 (NASA/IPAC Extragalactic Database) dois catálogos contendo informações básicas sobre os AGNs Seyfert tipo 1 e Seyfert tipo 2. O NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) é um banco de dados astronômico online para astrônomos que reúne e correlaciona informações astronômicas sobre objetos extragalácticos (galáxias, quasares, rádio, raios X, fontes infravermelhas, etc). Nele constam informações de objetos extragalácticos como posições precisas, referências bibliográficas relevantes, resumos de interesse extragaláctico, dados de fotometria e redshifts.

Chegaram a 10.054 objetos classificados como AGN Seyfert tipo 1 e 4.258 classificados como AGN Seyfert tipo 2. Como o banco de dados do catálogo NED/IPAC fornece um nome de SDSS e o banco de dados do catálogo Garching o objID, foram comparados usando o objID de campo fornecido em ambas as bases de dados. Desta forma quando foi utilizado o objID SDSS fornecido pelos bancos de dados NED/IPAC e o Garching para cruzamento das informações, foram encontrados 112 AGNs Seyfert tipo 1 e 463 AGNs Seyfert tipo 2. Destes procedimentos, resultou 463 Seyfert tipo-2 com massa estelar na faixa $9,4 < \log(M_*/M_\odot) < 11,6$. Por fim, [Dors et al. \(2020\)](#) corrigiram as intensidades das linhas por avermelhamento interno comparando o valor observado de $H\alpha/H\beta$ com o valor teórico igual a 2.86. Na Figura 7 são mostrados os 463 objetos da amostra que é utilizada no presente trabalho e também a linha representando o critério de seleção de [Kewley et al. \(2001\)](#) em um diagrama BPT.

Figura 7 – Diagrama diagnóstico $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$ versus $\log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$. Pontos representam os 463 AGNs Seyfert tipo 2 utilizados neste trabalho. A curva representa o critério de seleção proposto por Kewley et al. (2001).



Fonte: Dors et al. (2020)

2.2 Modelos de fotoionização

Consideramos a versão 17.0 do código CLOUDY (FERLAND et al., 2017) para construir grades de modelos de fotoionização assumindo uma ampla gama de parâmetros nebulares. Esses modelos são semelhantes aos considerados por Castro et al. (2017). Os parâmetros de entrada são descritos abaixo.

(i) SED: A distribuição espectral de energia (SED) foi assumida como sendo composta pela soma de dois componentes: um representando o *Big Blue Bump* com um pico a 1 Ryd, e a outra uma lei de potência com índice espectral $\alpha_x = -1$, representando a radiação de raios-X não térmica. O *continuum* entre 2 keV e 2500 Å é descrito por uma lei de potência com um índice espectral α_{ox} , para o qual consideramos três valores diferentes: -0.8 , -1.1 e -1.4 , aproximadamente a faixa de valores estimada observacionalmente para Seyferts e Quasares (e.g., Ho (1999) Miller et al. (2010); Zhu et al. (2019)). Quanto maior o valor de α_{ox} mais “duro” é o espectro ionizante. Deve-se notar que modelos que assumem $\alpha_{ox} < -1.4$ predizem intensidades de linha de emissão muito baixas (em relação a $H\beta$) quando comparadas com as de dados observacionais de AGNs (e.g. Dors et al. (2012)).

(ii) Metalicidade: Os valores de metalicidade em relação à metalicidade solar (Z/Z_\odot) = 0.2; 0.5; 0.75; 1.0; 1.5 e 2.0 foram considerados nos modelos. Assumindo a abundância de oxigênio solar $12+\log(O/H)_\odot=8.69$ (ASPLUND et al., 2009; PRIETO; LAMBERT; ASPLUND, 2001), os valores de Z acima correspondem a $12+\log(O/H)=8.0$, 8.40, 8.56, 8.69, 8.86, 9.00, respectivamente. A faixa considerada corresponde a faixa de valores derivados para AGNs com *redshift* que variam de ~ 0 a ~ 7 (e.g, ver Nagao, Maiolino e Marconi (2006b), Feltre, Charlot e Gutkin (2016), Matsuoka et al. (2018), Thomas et al. (2019), Mignoli et al. (2019), Pérez-Montero et al. (2019), Dors et al. (2014); Dors et al. (2015), Dors et al. (2018)). Encontramos que os modelos de fotoionização assumindo $(Z/Z_\odot) > 2,0$ produzem intensidades similares de $N2$, portanto, apenas $(Z/Z_\odot) \leq 2,0$ foram assumidos em nossa análise.

A abundância de todos os elementos pesados foi escalonada linearmente com Z , com exceção de abundância de nitrogênio, a qual foi calculada usando a seguinte relação:

$$\log(N/O) = 1.29 \times 12 + \log(O/H) - 11.84 \quad (2.7)$$

válida para $12+\log(O/H) \gtrsim 8.0$ ou $(Z/Z_\odot) \gtrsim 0.2$. Essa relação foi obtida por Dors et al. (2017) que utilizaram modelos detalhados de fotoionização para reproduzir intensidades de linhas de emissão, observadas no ótico, de uma amostra de 47 AGNs Seyfert tipo-2 localizadas a $z < 0,1$ e também levando em consideração as estimativas de abundância para as regiões H II, obtidas por Pilyugin e Grebel (2016) usando o método C (PILYUGIN; GREBEL; MATTSSON, 2012).

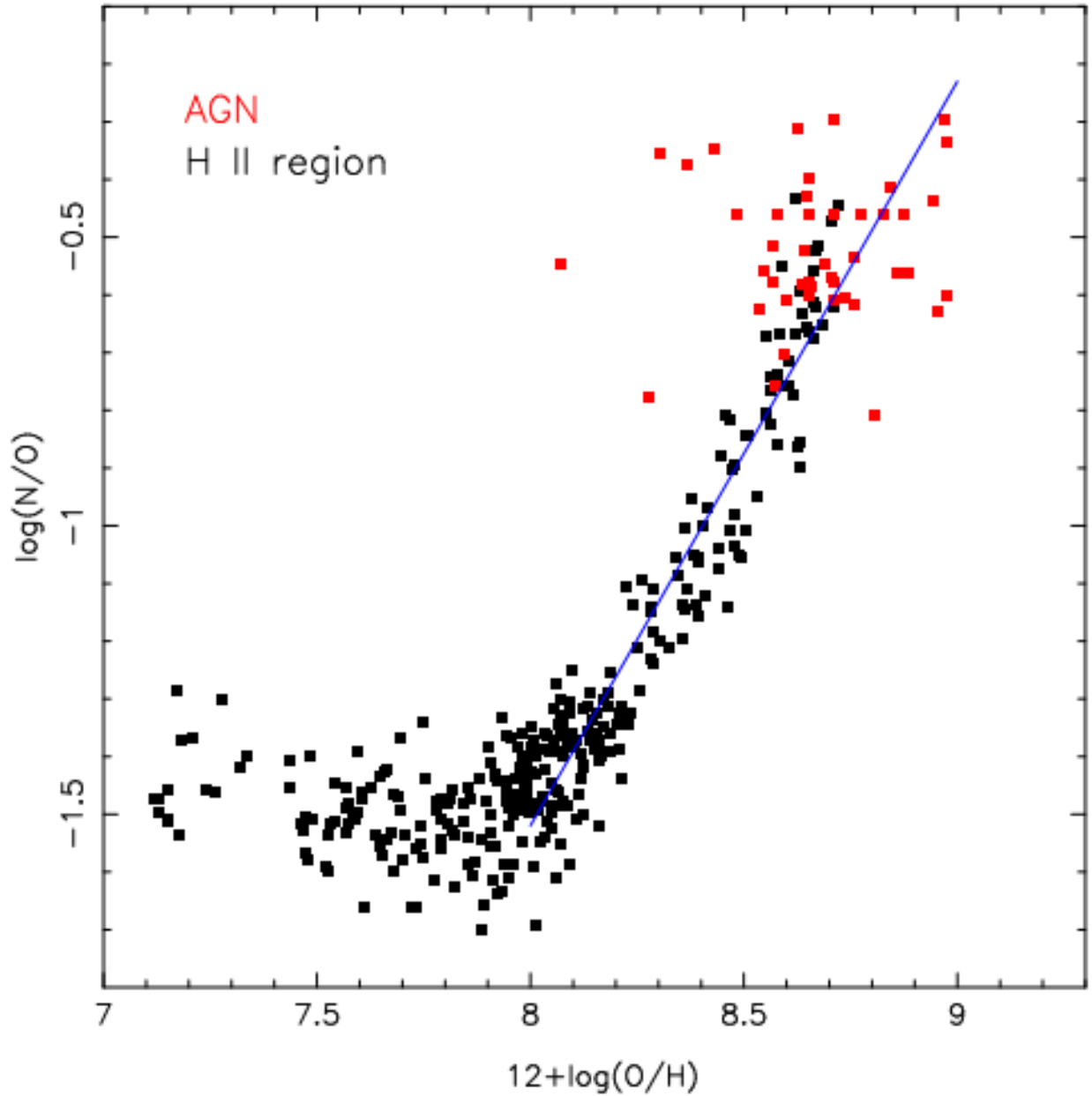
Na Figura 8 são apresentadas estimativas de abundância de N/O versus O/H de Dors et al. (2017) e Pilyugin e Grebel (2016) como também o ajuste sobre estes pontos

representado pela Equação 2.7.

Vincenzo e Kobayashi (2018) analisaram a evolução da relação (N/O) - (O/H) com o *redshift*, usando simulações hidrodinâmicas cosmológicas, incluindo modelos de enriquecimento químico estelar. Esses autores encontraram que maiores razões de abundância N/O, para um dado valor O/H, são derivadas para galáxias a *redshift* $z \lesssim 1$ em comparação com valores de galáxias a $z \gtrsim 5$. No entanto, o estudo realizado por Vincenzo e Kobayashi (2018) baseia-se na modelagem de regiões de formação estelar e, aparentemente, um resultado oposto é derivado para AGNs (Dors et al. 2019). Além disso, a relação (N/O) - (O/H) para regiões de formação de estrelas também podem mudar nos casos em que esses objetos estão localizados em galáxias em interação e/ou em aglomerados (KÖPPEN; HENSLER, 2005; DORS; COPETTI, 2006), embora isso não tenha sido demonstrado para AGNs. De qualquer forma, enfatizamos que a relação $Z - N2$ derivada neste trabalho deve ser utilizada para estudos de objetos em baixo *redshift* ($z \lesssim 0.4$) e deve ser aplicada com cautela para objetos em alto *redshift* ou para os AGNs na interação de galáxias.

A presença interna de poeira em nebulosas tem uma forte influência no espectro emitido destes objetos. Grãos de poeira absorvem a radiação ultravioleta mudando consideravelmente o grau de ionização do gás. Além disso, colisão de grãos de poeira com átomos do gás produz uma maior taxa de resfriamento do gás, conseqüentemente, alterando o espectro emitido (e.g. Dwek e Arendt (1992)). Em particular, os efeitos da redução de metais no gás ionizado em AGNs, contidos em grãos de poeira, foram analisados por Feltre, Charlot e Gutkin (2016). Estes autores encontraram que, quando a relação $(d/Z) = (\text{abundância de poeira}) / (\text{metalicidade})$ aumenta, ocorre uma redução na eficiência de resfriamento, implicando em um aumento de linhas emitidas por elementos não refratários, como a razão de linhas $N2$. Por outro lado, modelos de AGNs assumindo a presença de poeira tendem a não reproduzir a maioria das intensidades da linha de emissão observadas no ultravioleta (NAGAO; MAIOLINO; MARCONI, 2006b) e no ótico (MATSUOKA et al., 2009). Uma vez que a razão d/Z é pouco conhecida em nebulosas gasosas e AGNs (PEIMBERT; PEIMBERT, 2010) e, com o objetivo de não introduzir uma incerteza adicional em nossa calibração, todos os modelos de fotoionização considerados no presente trabalho não consideram a presença de poeira.

Figura 8 – Valores da razão de abundância de $\log(N/O)$ versus $12+\log(O/H)$. Pontos vermelhos são valores obtidos utilizando modelos detalhados de fotoionização construídos por [Dors et al. \(2017\)](#). Pontos pretos são estimativas para regiões H II derivadas de [Pilyugin e Grebel \(2016\)](#) pelo método C ([PILYUGIN; GREBEL; MATTSSON, 2012](#)). A linha representa uma regressão linear sobre os pontos representada pela Equação 2.7.



Fonte: Carvalho et al.(2020)

(iii) Parâmetro de ionização: O parâmetro de ionização U é definido por:

$$U = \frac{Q_{\text{ion}}}{4\pi R_{\text{in}}^2 N c}, \quad (2.8)$$

sendo Q_{ion} o número de fótons ionizantes de hidrogênio emitidos por segundo pela fonte ionizante, R_{in} é a distância da fonte ionizante à superfície interna da nuvem de gás [em cm], N é a densidade das partículas em cm^{-3} e c é a velocidade da luz (em cm s^{-1}). Diferentes valores de U simulam um gás com diferentes valores de massa, grau de ionização e geometria. Consideramos o logaritmo de U na faixa de $-4.0 \leq \log U \leq -0.5$, com um passo de 0.5 dex, i.e. a mesma faixa de valores considerados por [Feltre, Charlot e Gutkin \(2016\)](#) para AGNs. O raio externo foi definido como sendo o raio em que a temperatura do gás atinge 4.000 K (valor padrão do raio externo no código Cloudy). A geometria resultante dos nossos modelos foi, na sua maioria, plano paralela.

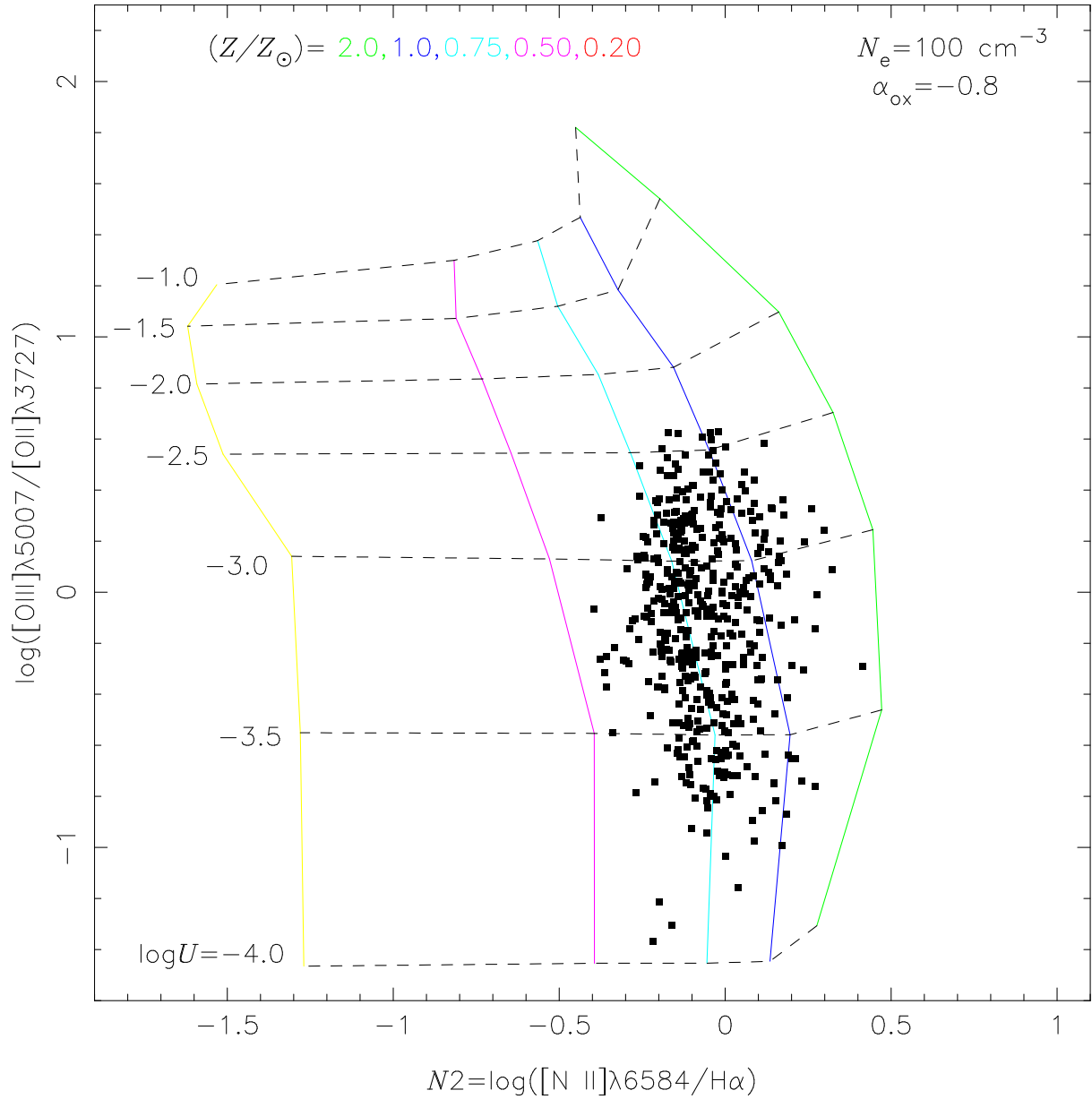
(iv) Densidade eletrônica: Três valores de densidade eletrônica, constantes ao longo do raio NLR, foram assumidos nos modelos: $N_e = 100, 500$ e 3000 cm^{-3} . Esses valores cobrem a faixa de densidade eletrônica para AGNs Seyfert tipo-2 derivados a partir da razão de linhas $[\text{S II}]\lambda 6716/\lambda 6731$ ([VAONA et al., 2012](#); [ZHANG](#); [LIANG](#); [HAMMER, 2013](#)).

No total, 399 modelos de fotoionização foram construídos cobrindo ampla gama de parâmetros de AGN.

3 Resultados

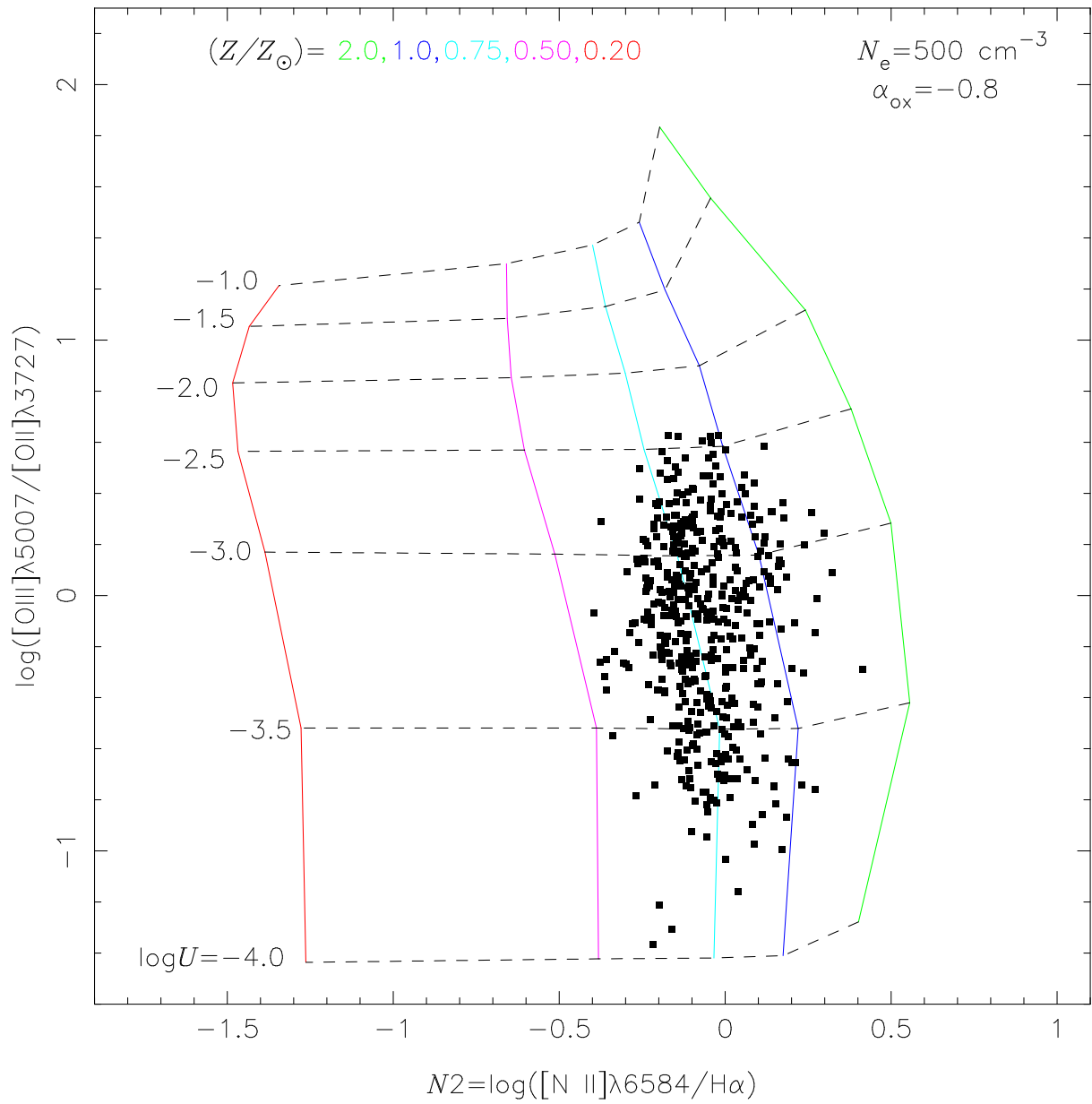
Nas Figuras 9-17 mostramos os diagramas diagnósticos $\log([\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727)$ versus $N2 = \log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ contendo os dados observacionais e os resultados dos modelos de fotoionização descritos anteriormente. Grades de modelos assumindo suposições distintas sobre os valores de N_e e α_{ox} são consideradas em cada Figura. Escolhemos este diagrama pois a razão de linhas $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ possui uma maior dependência com o parâmetro de ionização (U) do que com a metalicidade. Pode-se notar que modelos de fotoionização com $N_e = 100, 500$ e 3000 cm^{-3} e $\alpha_{ox} = -0.8, -1.1$ reproduzem os dados observacionais. No entanto, quando $\alpha_{ox} = -1.4$ é considerado, a maioria dos modelos subestimam $N2$. Modelos detalhados de fotoionização construídos por Dors et al. (2017) e resultados da comparação bayesiana entre linhas de emissão e preditas por modelos de fotoionização de Pérez-Montero et al. (2019) também indicaram que $\alpha_{ox} = -1.4$ não é representativo para Seyfert tipo-2. Portanto, modelos com $\alpha_{ox} = -1.4$ não são considerados na derivação da calibração $Z - N2$. Assim como encontrado por Groves, Dopita e Sutherland (2004) e Feltre, Charlot e Gutkin (2016), nossos modelos indicam que intensidades de linhas de emissão de AGNs observadas no ótico são pouco sensíveis a N_e , pelo menos para o regime de baixa densidade eletrônica ($N_e < 10^4 \text{ cm}^{-3}$).

Figura 9 – $\log([\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$ vs $([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ para modelos assumindo $N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ e $\alpha_{\text{ox}} = -0.8$. Pontos representam intensidades observacionais da razão das linhas de emissão extraídas do SDSS-DR7 (ver Seção 2.1). Linhas sólidas conectam os resultados do modelo de fotoionização com mesma metalicidade, enquanto linhas tracejadas conectam os modelos com o mesmo logaritmo do parâmetro de ionização U , como indicado (ver Seção 2.2).



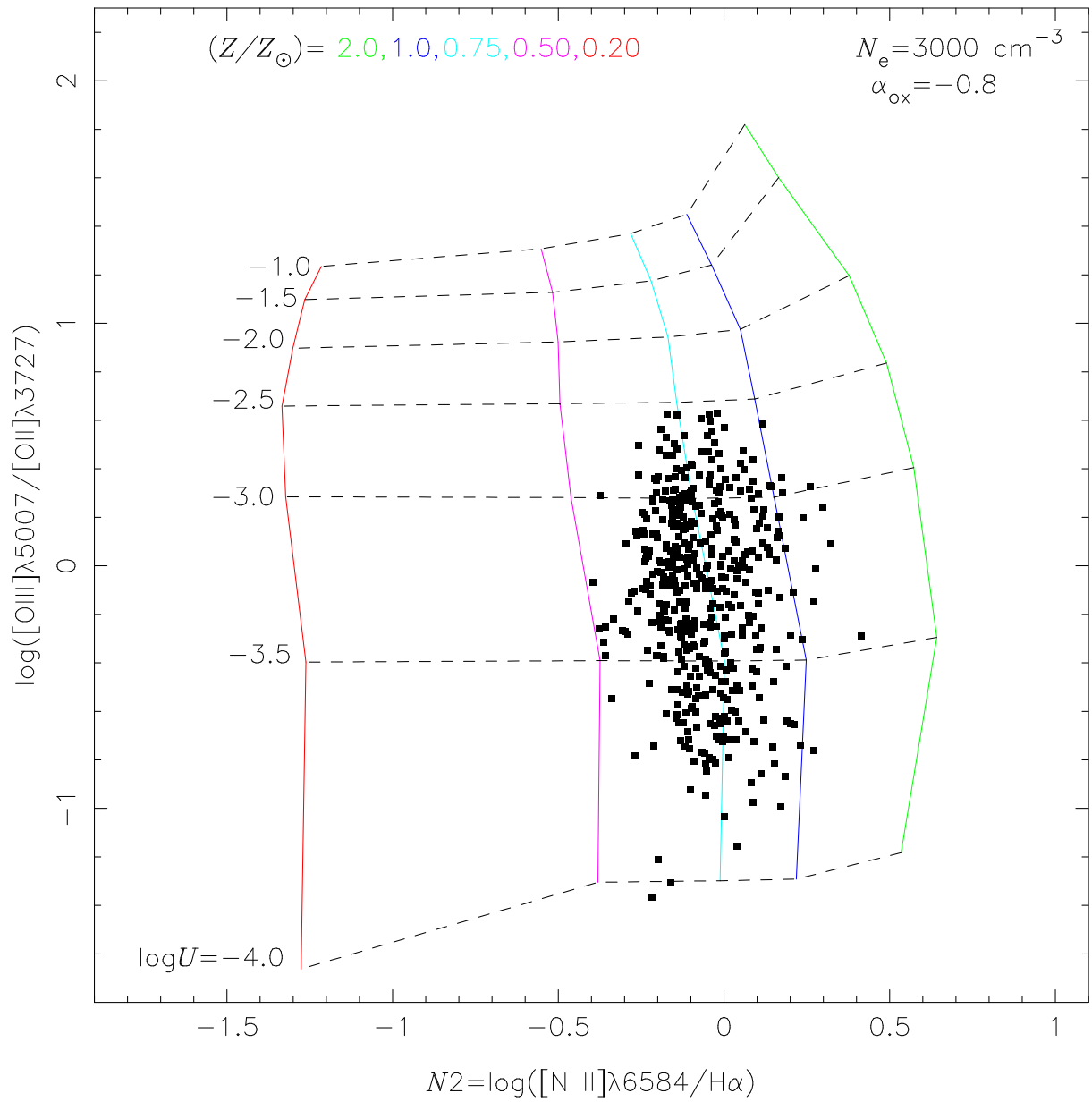
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 10 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 500 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -0.8$.



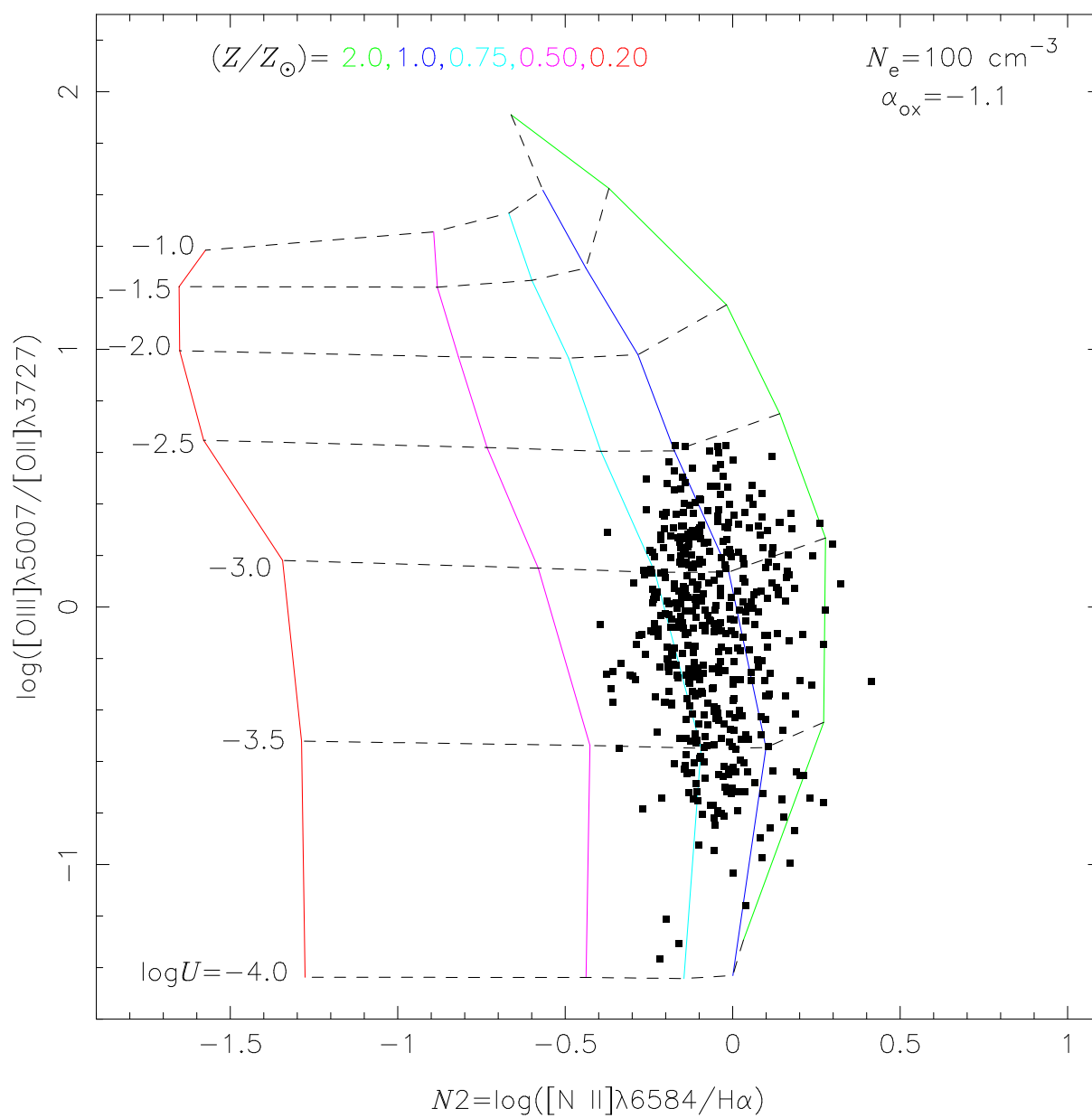
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 11 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 3000 \text{ cm}^{-3}$ e $\alpha_{ox} = -0.8$.



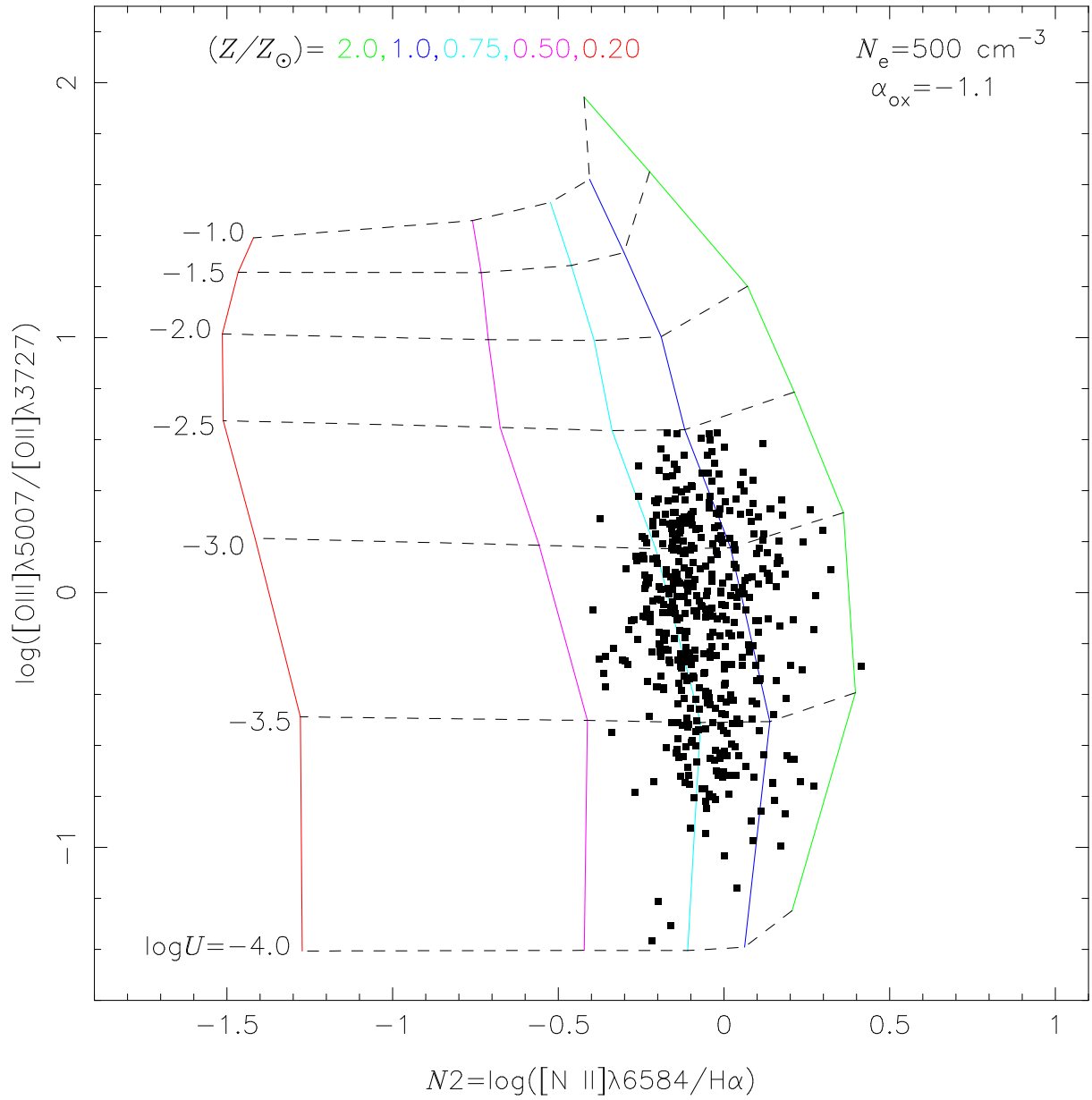
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 12 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 100 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.1$.



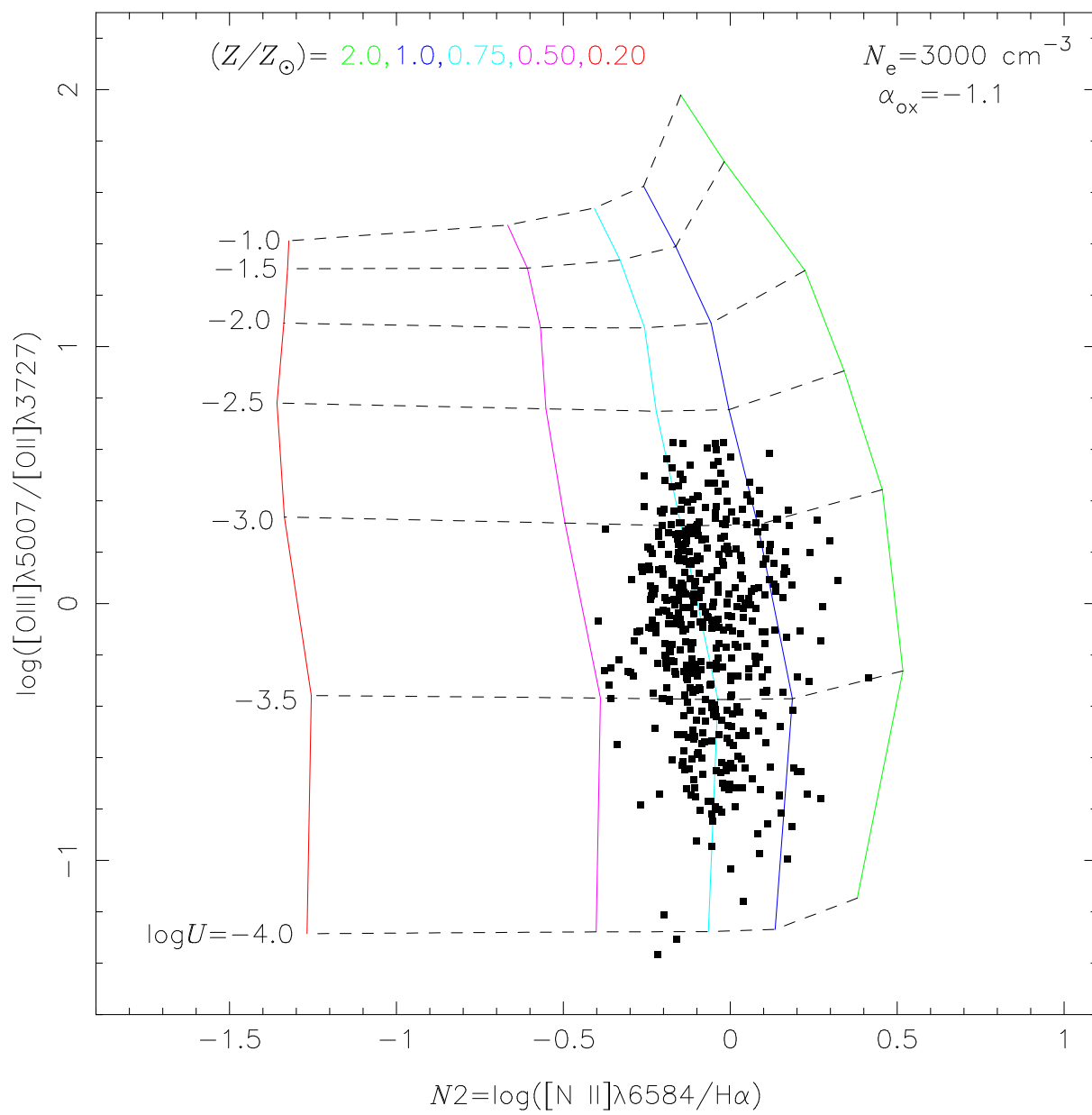
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 13 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 500 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.1$.



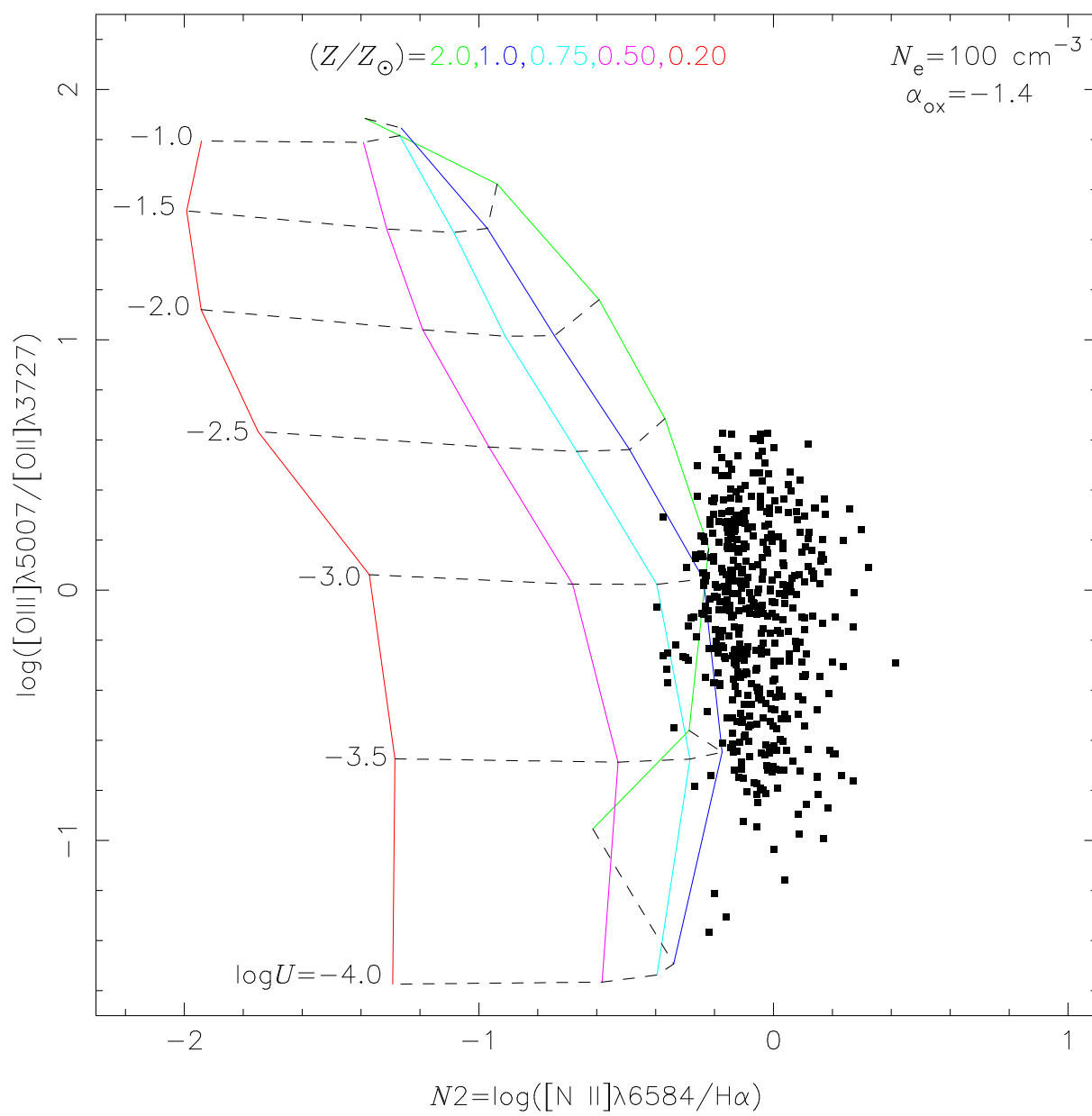
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 14 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 3000 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.1$.



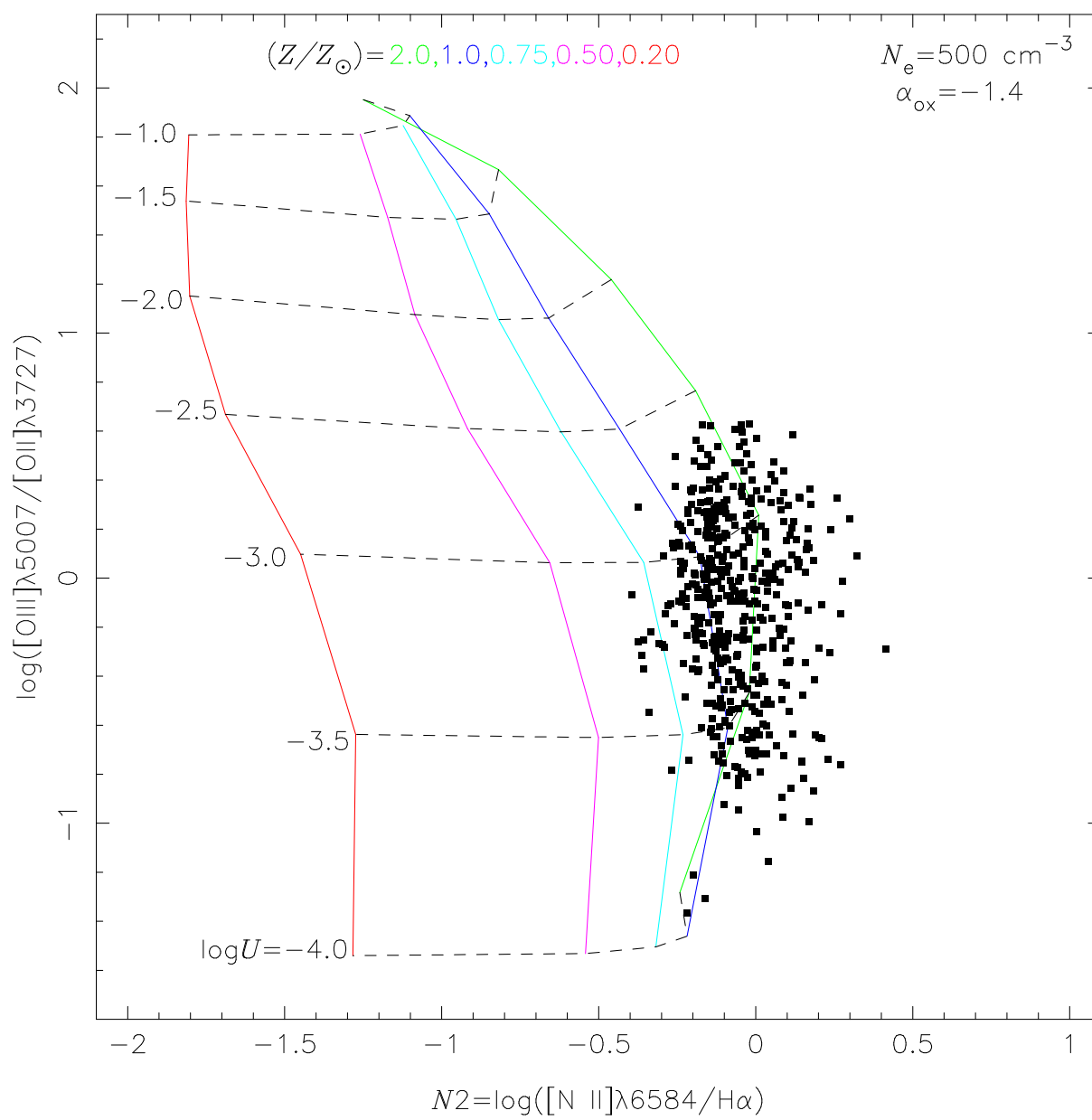
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 15 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 100 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.4$.



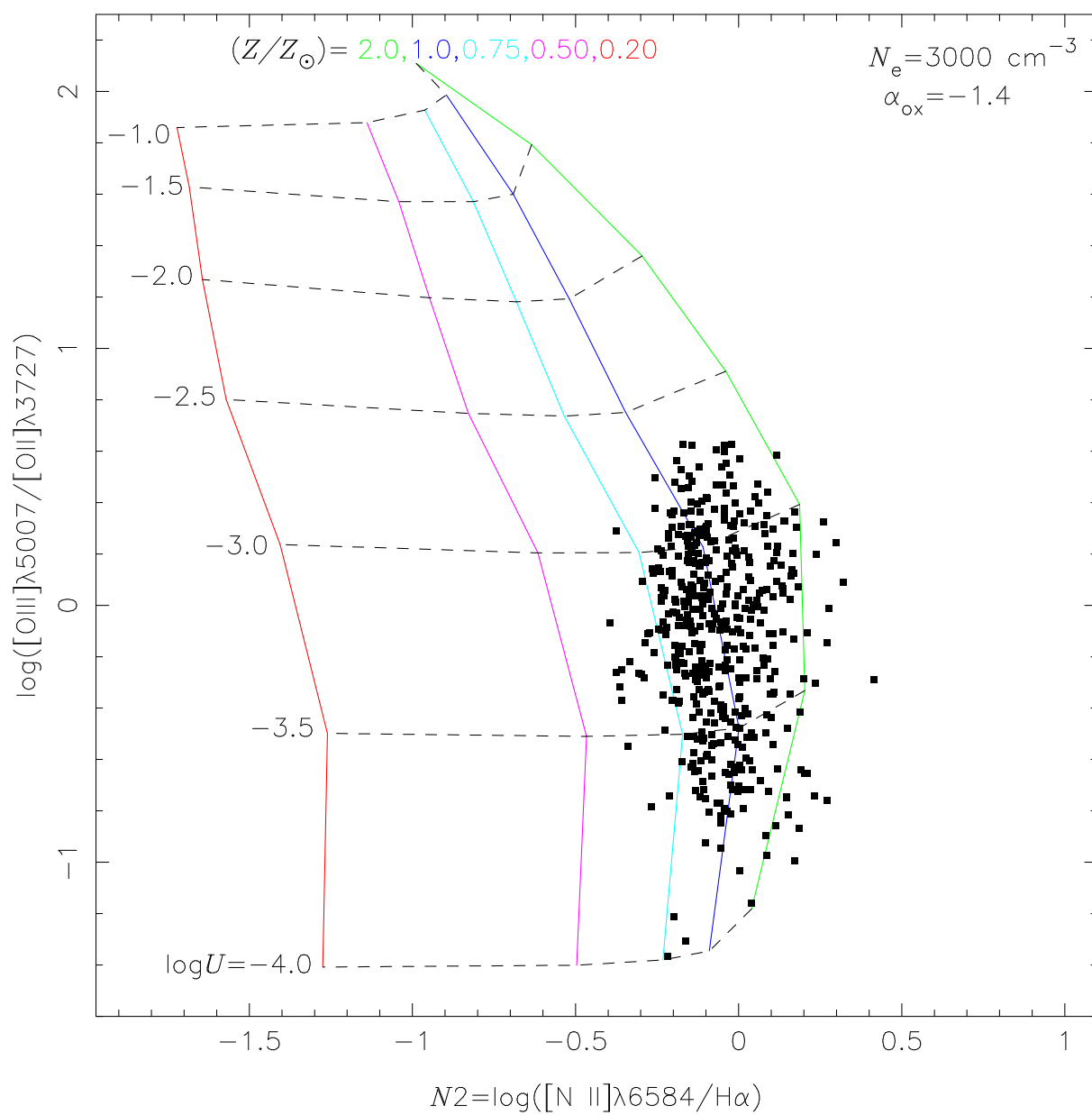
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 16 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 500 \text{ cm}^3$ e $\alpha_{ox} = -1.4$.



Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 17 – Como a Figura 9 mas para $N_e = 3000 \text{ cm}^{-3}$ e $\alpha_{ox} = -1.4$.



Fonte: Carvalho et al. (2020)

Para calibrar a metalicidade em função do índice $N2$, calculamos o logaritmo do parâmetro de ionização e a metalicidade de cada objeto de nossa amostra por interpolações lineares entre os modelos mostrados nas Figuras 9-17. O erro típico nas intensidades da razão da linha de emissão é aproximadamente 0.1 dex (e.g., Denicoló, Terlevich e Terlevich (2002) Kennicutt, Bresolin e Garnett (2003)). Assumindo essa incerteza nos dados observacionais, obtivemos um erro nas estimativas interpoladas Z e $\log U$ na ordem de 30% e 0.05 dex, respectivamente.

Na Figura 18 a relação entre Z/Z_{\odot} e $N2$, é mostrada considerando distintos de N_e , α_{ox} e faixas de $\log U$. Usamos a seguinte expressão para ajustar os resultados:

$$\log(Z/Z_{\odot}) = a^{N2} + b \quad (3.1)$$

Os coeficientes de ajuste estão listados na Tabela 1. Como pode ser visto, os valores dos coeficientes para distintas faixas de $\log U$ são similares, indicando uma dependência muito baixa da relação $Z-N2$ com o grau de ionização no AGN. Por outro lado, uma dependência da relação $Z - N2$ com N_e é encontrada, no sentido que maior (até um fator de 2) estimativas de Z são obtidas quando modelos de fotoionização com menor N_e são considerados, principalmente para o regime de alta metalicidade [$Z/Z_{\odot} \gtrsim 1.0$]. Da mesma forma, uma dependência de $Z - N2$ e α_{ox} também pode ser notada, no sentido de que maior metalicidade (até um fator de 2) é derivada se $\alpha_{ox} = -1, 1$ é assumido em comparação com aqueles que consideram -0.8 . Um comportamento oposto foi encontrado por Dors et al. (2020) para a relação entre Z e razões de linha de emissão observadas no ultravioleta (ver também Nagao, Maiolino e Marconi (2006b)).

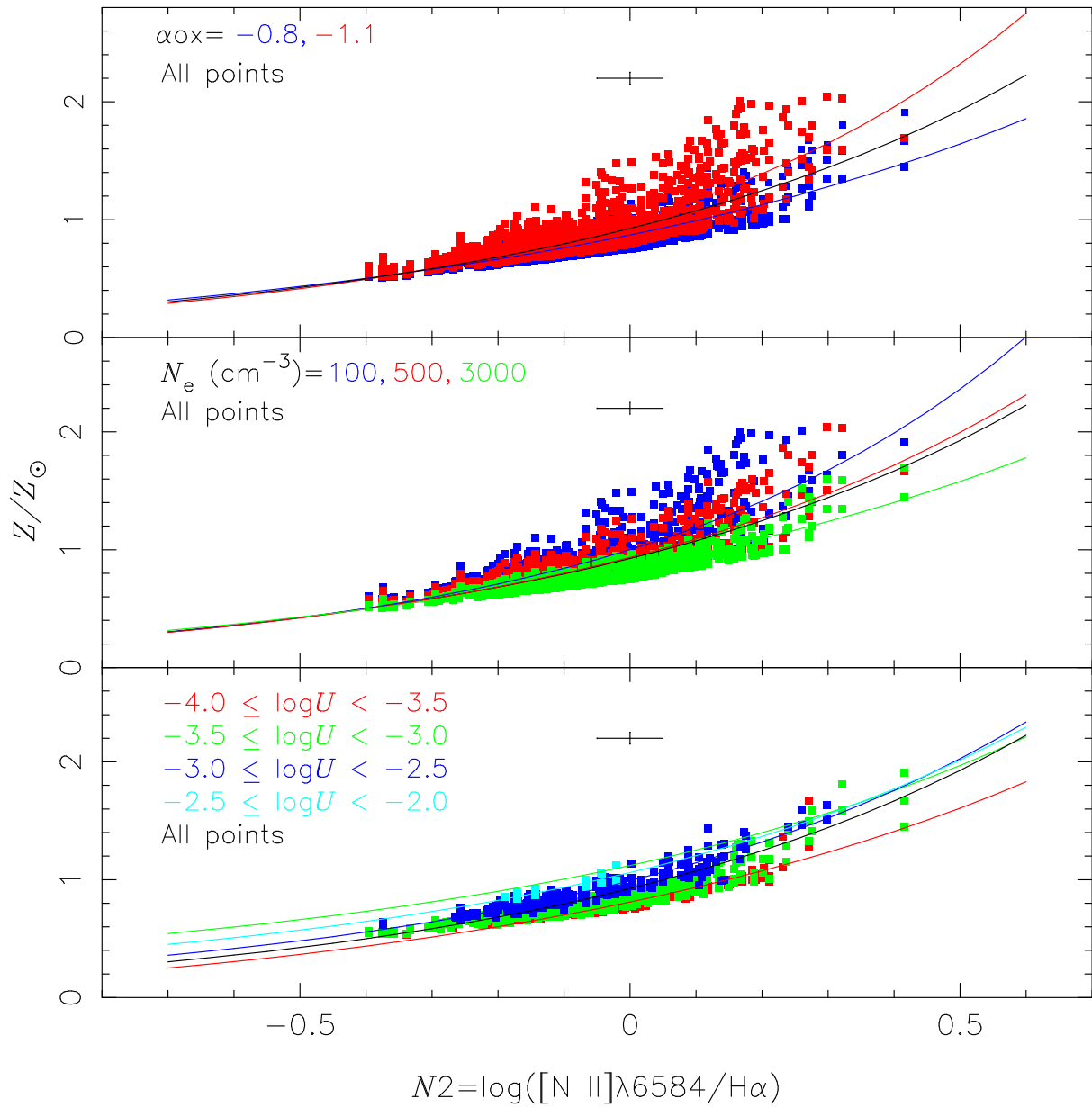
Os valores interpolados das Figuras 9-17 tornam possível derivar uma relação entre o logaritmo do parâmetro de ionização e a razão de linhas $[O III]/[O II]$. Na Figura 19 mostramos os valores de $\log U$ estimados para a amostra de objetos versus o logaritmo de $[O III]/[O II]$. Uma regressão linear sobre os pontos produz

$$\log U = (0.57 \pm 0.01x^2) + (1.38 \pm 0.01x) - (3.14 \pm 0.01), \quad (3.2)$$

sendo $x = \log([O III]\lambda 5007/[O II]\lambda 3727)$.

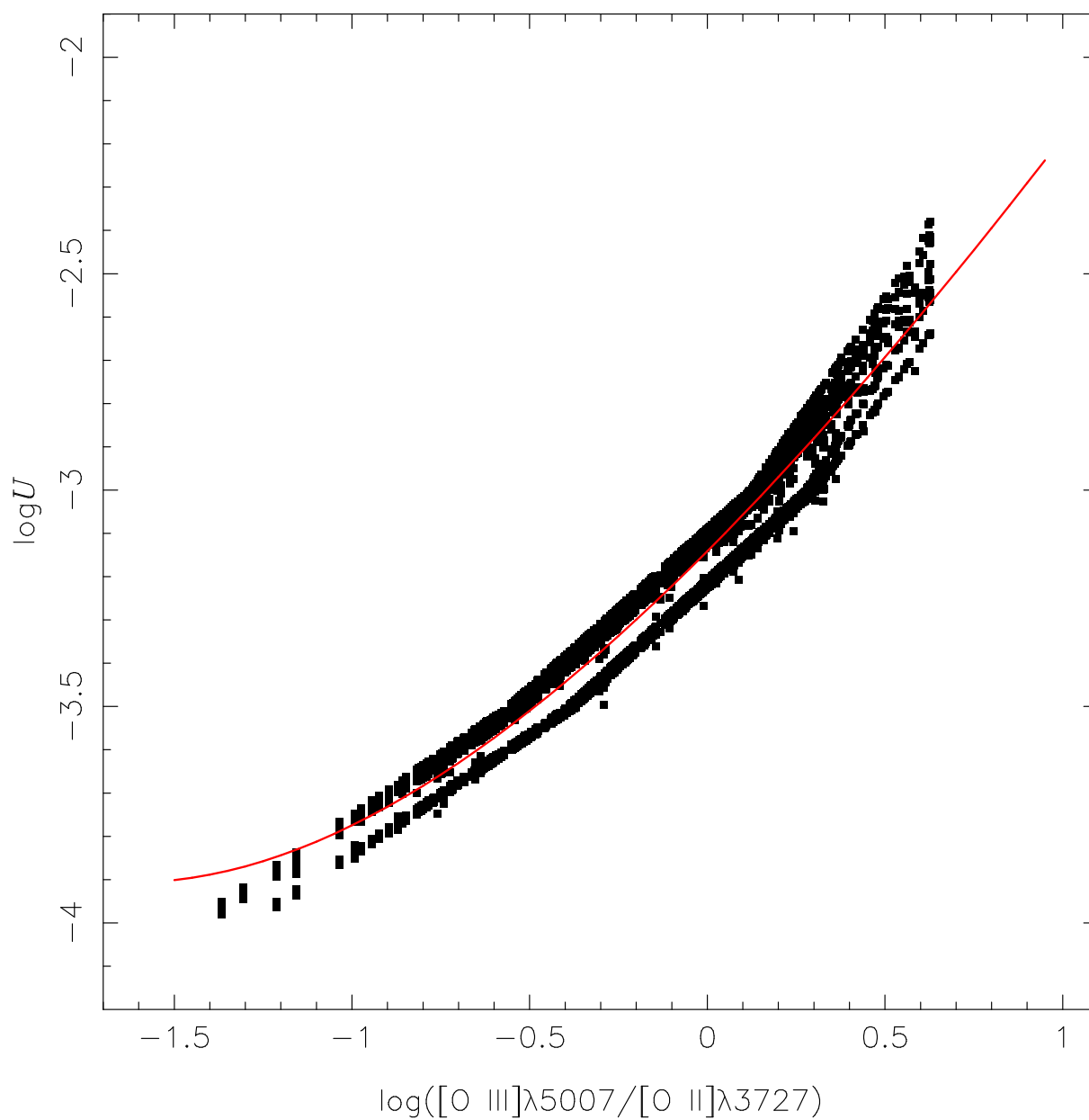
Não encontramos nenhuma dependência desta equação com N_e , α_{ox} e Z .

Figura 18 – Metalicidade (Z/Z_{\odot}) vs. $N2$. Pontos representam estimativas obtidas por interpolações lineares entre os modelos de fotoionização e os dados observacionais nas Figuras 9-17. Curvas representam o ajuste da Equação 3.1 aos pontos considerando diferentes parâmetros dos modelos (indicados em cada painel). Barras de erro em cada painel representam erros típicos (0.1 dex) na medida observacional de $N2$ (DENICOLÓ; TERLEVICH; TERLEVICH, 2002) e a incerteza de 30% nos valores interpolados.



Fonte: Carvalho et al. (2020)

Figura 19 – Logaritmo do parâmetro de ionização ($\log U$) versus $\log(\text{O III}\lambda 5007/\text{O II}\lambda 3727)$. Pontos representam valores de $\log U$ estimados para a amostra de objetos (obtidos a partir das Figuras 9-17) e o valor correspondente de $[\text{O III}]/[\text{O II}]$. A curva representa o ajuste aos pontos representado pela Equação 3.2. O erro no valor interpolado de $\log U$ é aproximadamente 0.05 dex.



Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Tabela 1 – Valores dos coeficientes a e b resultantes do ajuste da Equação 3.1 aos pontos da Figura 18 considerando para diferentes parâmetros dos modelos. A última linha lista os coeficientes obtidos não discriminando os parâmetros dos modelos.

Parâmetros dos Modelos	a	b
$\log U$		
(-4.0, -3.5)	3.23 ± 0.11	-0.19 ± 0.01
(-3.5, -3.0)	3.42 ± 0.06	-0.12 ± 0.01
(-3.0, -2.5)	4.15 ± 0.12	-0.01 ± 0.01
(-2.5, -2.0)	3.82 ± 1.01	$+0.06 \pm 0.02$
N_e (cm ³)		
100	5.58 ± 0.23	$+0.00 \pm 0.01$
500	4.24 ± 0.12	-0.06 ± 0.01
3000	2.99 ± 0.04	-0.15 ± 0.01
α_{ox}		
-0.8	3.14 ± 0.05	-0.13 ± 0.01
-1.1	5.45 ± 0.17	-0.01 ± 0.01
Todos os pontos	4.01 ± 0.08	-0.07 ± 0.01

Adaptado de [Carvalho et al. \(2020\)](#)

4 Discussão

Storchi-Bergmann, Calzetti e Kinney (1994) propuseram o uso da razão de linha $N2 = \log([\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$ como um indicador da metalicidade (traçada pela abundância de O/H) de regiões H II. Esses autores obtiveram uma calibração baseada nas abundâncias O/H calculadas pelo método T_e e pelas intensidades observacionais de linhas de emissão de galáxias com formação estelar. Esta foi, de fato, a primeira calibração empírica entre metalicidade e linhas fortes, posteriormente aperfeiçoada por Pilyugin (2000) e Pilyugin (2001). Depois disso, outros autores (RAIMANN et al., 2000; DENICOLÓ; TERLEVICH; TERLEVICH, 2002; PETTINI; PAGEL, 2004; LIANG et al., 2006; STASIŃSKA et al., 2006; NAGAO; MAIOLINO; MARCONI, 2006a; YIN et al., 2007; PÉREZ-MONTERO; CONTINI, 2009; MARINO et al., 2013; MORALES-LUIS et al., 2014) propuseram novas calibrações incluindo mais estimativas de abundância, principalmente considerando objetos de baixa e alta metalicidades.

A vantagem do índice $N2$ sobre o índice R_{23} , comumente utilizado como indicador da metalicidade de regiões de formação estelar, é explicada a seguir:

- (i) não inclui a linha $[\text{O II}]\lambda 3727$, o que torna essa razão de linha muito pouco sensível a correção do avermelhamento e, conseqüentemente, útil para estudos de objetos obscurecidos por poeira (XIAO et al., 2012);
- (ii) devido ao fato do $N2$ considerar linhas de emissão com comprimento de onda muito próximo, ele não é afetado por incertezas da calibração de fluxo (MARINO et al., 2013);
- (iii) é acessível no infravermelho próximo em *redshift* moderado a alto (CRESCI et al., 2012; QUEYREL et al., 2012);
- (iv) possui pouca dependência com o parâmetro de ionização;
- (v) não produz valores degenerados de Z , pelo menos para $0,2 \lesssim (Z/Z_\odot) \lesssim 2,0$;
- (vi) tem uma forte correlação com O/H (DENICOLÓ; TERLEVICH; TERLEVICH, 2002).

Apesar das várias vantagens, como outros indicadores de Z , o índice $N2$ sofre algumas limitações. Em primeiro lugar, para qualquer calibração teórica envolvendo linhas de nitrogênio, é necessário conhecer a dependência entre as razões de abundância N/O e O/H (PÉREZ-MONTERO; CONTINI, 2009). Para AGNs, essa relação foi derivada primeiro por Dors et al. (2017), que usaram modelos detalhados de fotoionização

para reproduzir linhas de emissão de uma amostra relativamente pequena (44 objetos) de AGNs Seyfert tipo-2 com $z < 0,1$. Obviamente, é necessário obter estimativas de abundância de N e O para uma amostra maior de objetos e em um intervalo maior de *redshift*. Além disso, a dependência entre as linhas de nitrogênio e Z (ou O/H) se deve à origem da nucleossíntese estelar secundária do nitrogênio [$(N/H) \approx Z$] no regime de alta metalicidade [$(Z/Z_{\odot}) \gtrsim 0.3$] (VILA-COSTAS; EDMUNDS, 1993). Portanto, calibrações envolvendo linhas de nitrogênio não são válidas para o regime de baixa metalicidade. Por fim, o índice $N2$ satura no regime de alta metalicidade (MARINO et al., 2013). No caso de nossa calibração $Z - N2$, ela é válida para o intervalo de $[0.3 \lesssim (Z/Z_{\odot}) \lesssim 2.0]$, que corresponde a $-0.7 \lesssim N2 \lesssim 0.6$.

Em relação à dependência da calibração de $Z - N2$ com a densidade eletrônica (N_e), encontramos que esta é mais proeminente no regime de alta metalicidade [$(Z/Z_{\odot}) \gtrsim 1.0$]. Embora a N_e seja facilmente estimada em AGNs devido à dependência deste parâmetro com a razão de linha $[S\ II]\lambda 6716/\lambda 6731$, o erro observacional de $N2$ de ~ 0.05 dex (DENICOLÓ; TERLEVICH; TERLEVICH, 2002) produz uma incerteza de Z da ordem das obtidas sem levar em consideração os efeitos do N_e em nossa calibração. Isso pode ser visto na Figura 18, onde o erro típico de $N2$ é mostrado nos painéis. O mesmo resultado é derivado para o efeito de α_{ox} nas estimativas de metalicidade, na qual a incerteza de Z em não conhecer α_{ox} é da ordem da incerteza produzida pelo erro observacional de $N2$.

Com o objetivo de validar a calibração $Z - N2$, na Figura 20, comparamos os resultados de metalicidade para a nossa amostra de objetos obtidos assumindo a nossa calibração (Equação 3.1) e não discriminando os parâmetros nebulares (i.e. assumindo todos os pontos, ver Tabela 1) com estimativas obtidas pela primeira calibração de Storchi-Bergmann et al. (1998) e a calibração de Castro et al. (2017), bem como, os resultados obtidos pela aproximação bayesiana proposta por Pérez-Montero et al. (2019). No que segue, uma breve descrição destas calibrações é apresentada.

4.1 Storchi-Bergmann et al. (1998)

Storchi-Bergmann et al. (1998) construíram uma grade de modelos de fotoionização, utilizando o código Cloudy, com o objetivo de produzir duas calibrações entre a metalicidade e razões de linhas estreitas observadas no ótico de AGNs. A primeira calibração utiliza as linhas $N2$ versus $[O\ III]/H\beta$ e a segunda $N2$ versus $[O\ III]/[O\ II]$. Diferenças entre as estimativas da abundância de O/H é da ordem de 0,1 dex (STORCHI-BERGMANN et al., 1998; DORS et al., 2020), logo, vamos considerar apenas uma calibração proposta por estes autores (ver abaixo).

Os modelos de Storchi-Bergmann et al. (1998) assumem a relação (N/O)-(O/H) derivada para galáxias *starbursts* por Storchi-Bergmann, Calzetti e Kinney (1994) dada

por

$$\log(\text{N/O}) = [0.96 \times (12 + \log(\text{O/H}))] - 9.29. \quad (4.1)$$

A primeira calibração proposta por [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#) é dada por

$$\begin{aligned} (\text{O/H})_{SB98,1} = & 8.34 + (0.212x) - (0.012x^2) - (0.002y) + (0.007xy) - (0.002x^2y) + (6.52 \times 10^{-4}y^2) + \\ & (2.27 \times 10^{-4}xy^2) + (8.87 \times 10^5x^2y^2), \end{aligned} \quad (4.2)$$

sendo

$$x = [\text{N II}](\lambda 6548 + \lambda 6584) / \text{H}\alpha$$

e

$$y = [\text{O III}](\lambda 4959 + \lambda 5007) / \text{H}\beta.$$

O termo O/H corresponde a $12 + \log(\text{O/H})$ e é convertido em metalicidade por

$$(Z/Z_{\odot}) = 10^{[8.69 - (\text{O/H})_{SB98,1}]} \quad (4.3)$$

sendo 8.69 dex a abundância solar do oxigênio ([ASPLUND et al., 2009](#); [PRIETO; LAMBERT; ASPLUND, 2001](#)). A calibração acima é válida para $8.4 \leq 12 + \log(\text{O/H}) \leq 9.4$. Uma correção na derivação O/H devido a dependência da calibração com a densidade de eletrônica é dada por:

$$(\text{O/H})_{\text{final}} = (\text{O/H}) - 0.1 \times \log[\text{N}_e/300(\text{cm}^{-1})] \quad (4.4)$$

4.2 Castro et al. (2007)

A única calibração para AGNs proposta na literatura que utiliza linhas observadas no ótico, após as de [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#), foi proposta por [Castro et al. \(2017\)](#) e consiste em uma calibração entre Z e $N2O2 = \log([\text{N II}]\lambda 6484 / [\text{O II}]\lambda 3727)$. Diferentemente das calibrações puramente teórica de [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#), [Castro et al. \(2017\)](#) considerou uma metodologia semi-empírica, como a deste trabalho. Estes autores assumiram nos modelos de fotoionização a seguinte relação (N/O)-(O/H) derivada para regiões de formação estelar por [Dopita et al. \(2000\)](#):

$$\log(\text{N/H}) = -4.57 + \log(Z/Z_{\odot}) \quad (4.5)$$

para $\log(Z/Z_{\odot}) \leq 0.63$

e

$$\log(\text{N}/\text{H}) = -3.94 + 2 \log(\text{Z}/\text{Z}_\odot) \quad (4.6)$$

para $\log(\text{Z}/\text{Z}_\odot) > 0.63$.

A calibração derivada por [Castro et al. \(2017\)](#) é dada por

$$(\text{Z}/\text{Z}_\odot) = 1.08(\pm 0.19) \times \text{N2O2}^2 + 1.78(\pm 0.07) \times \text{N2O2} + 1.24(\pm 0.01). \quad (4.7)$$

4.3 Pérez-Montero et al.(2019)

O código bayesiano H II-CHI-MiSTRY (doravante HCm) ([PÉREZ-MONTERO et al., 2013](#)) foi usado, inicialmente, para estimar as razões de abundância de O/H e N/O de regiões de formação estelar. Este código é baseado em uma comparação bayesiana entre certas razões de linhas de emissão observadas e preditas por modelos de fotoionização construídos com o código CLOUDY. O código HCm não considera uma relação fixa (N/O)-(O/H). Em [Pérez-Montero et al. \(2019\)](#) este código foi adaptado para AGNs.

4.4 Comparação entre estimativas

Na Figura 20 diferenças entre a estimativa de Z/Z_\odot obtidas utilizando a nossa calibração (Equação 3.1, assumindo todos os pontos) e as obtidas utilizando a calibração propostas por [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#), [Castro et al. \(2017\)](#) e pelo código HCm (descritos acima) são apresentadas. Podemos ver que é encontrada uma diferença sistemática entre as estimativas baseadas na nossa calibração $\text{Z}-\text{N}2$ e as obtidas pela calibração de [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#), no sentido de que esta última calibração produz valores Z cada vez mais altos para o regime de baixa e mais baixo para o regime de alta metalicidade.

Embora resultados semelhantes tenham sido obtidos para a diferença entre as estimativas usando a calibração de $\text{Z} - \text{N2O2}$ e o código HCm, esta diferença é menos proeminente que a obtida pelo uso da calibração de [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#).

As diferenças nas estimativas de Z encontradas na Figura 20 são provavelmente devido ao uso de relações distintas (N/O)-(O/H) nos modelos de fotoionização utilizados para obter as calibrações. Na Figura 21, a relação (N/O)-(O/H) assumida nos modelos de fotoionização utilizados neste trabalho (Equação 2.7) é comparada com as relações utilizadas por [Storchi-Bergmann et al. \(1998, Equação 4.1\)](#) e por [Castro et al. \(2017, Equação 4.5\)](#). Pode-se ver que a relação (N/O)-(O/H) assumida no presente trabalho e por [Castro et al. \(2017\)](#) são muito semelhantes, justificando a menor diferença Z encontrada na Figura 20. Por outro lado, a relação usada por [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#) produz

abundâncias inferiores de N/O em comparação com as relações assumidas nas calibrações de $N2$ e $N2O2$.

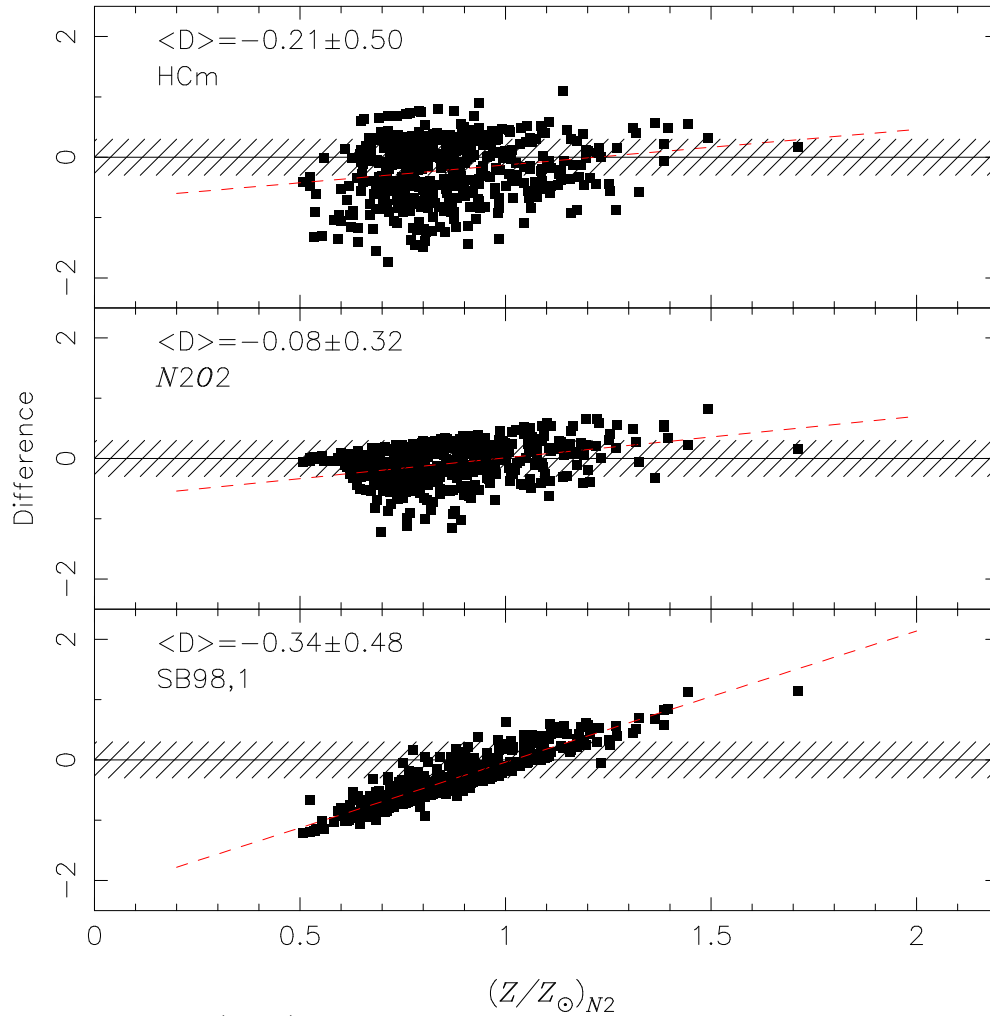
Em relação ao parâmetro de ionização, poucos autores propuseram uma calibração entre U e razões de linhas estreitas observadas no ótico de AGNs. Por exemplo, [Penston et al. \(1990\)](#) propuseram uma calibração entre U e a razão de linhas $[O II]\lambda 3727/[O III]\lambda 5007$. Esses autores utilizaram sequências de modelos de fotoionização, extraídos de [Robinson et al. \(1987\)](#), empregando uma variedade de possíveis SEDs para a fonte ionizante e assumindo apenas um valor da densidade de elétrons ($N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$) e metalicidade solar. A relação derivada de [Penston et al. \(1990\)](#) é dada por:

$$\log U = -2,74 - y, \quad (4.8)$$

sendo $y = \log([OII]\lambda 3727/[O III]\lambda 5007)$

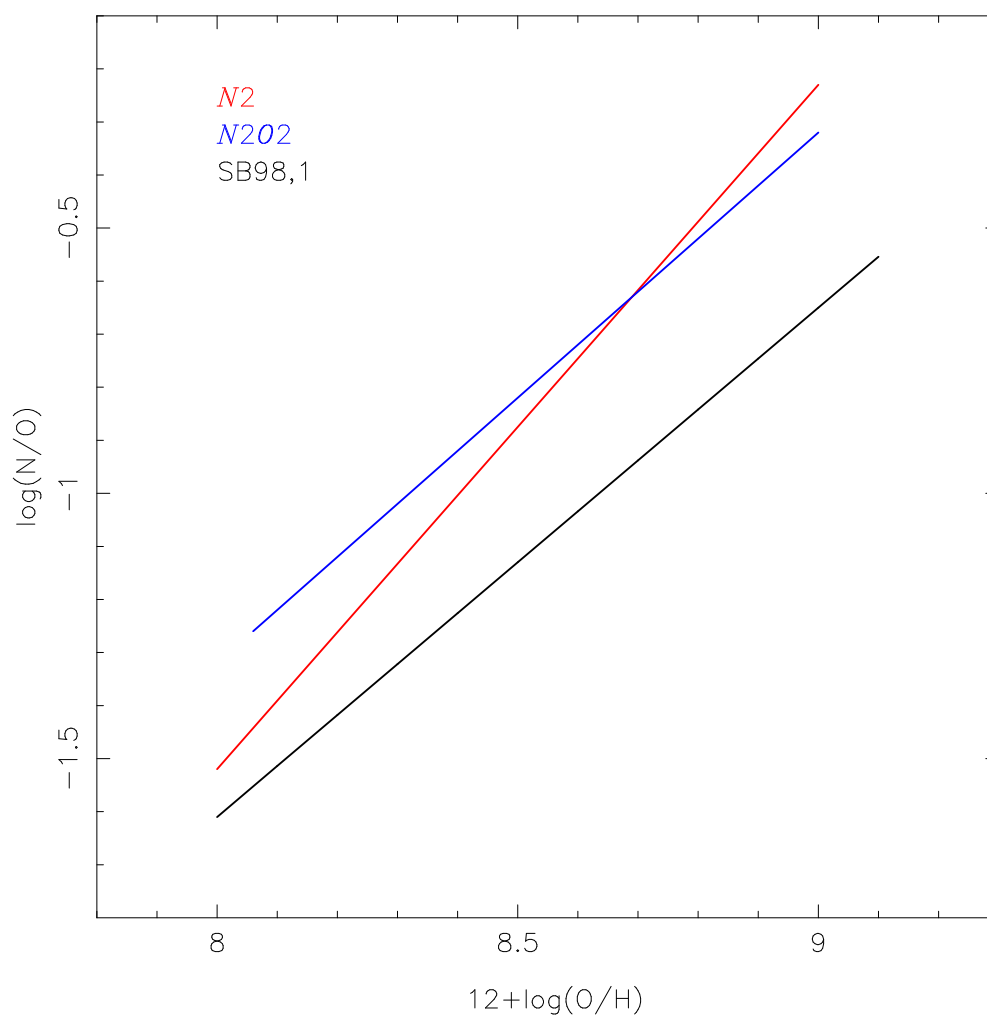
A definição de U assumida em [Robinson et al. \(1987\)](#) é igual ao de nossos modelos. Logo, é possível comparar estimativas derivadas de sua calibração com as obtidas pela nossa. Na Figura 22, valores do logaritmo do parâmetro de ionização ($\log U$) para a nossa amostra de objetos obtidos utilizando a nossa calibração (Equação 3.2) são comparados com os valores obtidos utilizando a calibração de [Penston et al. \(1990\)](#). Pode ser visto que, em geral, a calibração de [Penston et al. \(1990\)](#) produz valores de $\log U$ um pouco mais altos do que os derivados pela nossa calibração. Essa discrepância, provavelmente, se deve a calibração proposta por [Penston et al. \(1990\)](#) ter sido obtida usando modelos de fotoionização com valores fixos de N_e e Z , enquanto nossa calibração é considerada uma aproximação semi-empírica levando em conta uma grande faixa de parâmetros nebulares.

Figura 20 – Painel inferior: diferença entre as estimativas de metalicidade para a amostra de objetos utilizada neste trabalho obtida utilizando a calibração proposta neste trabalho $Z - N2$ (Equação 3.1) e utilizando a calibração de [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#) (Equação 4.2) versus as estimativas de $Z - N2$. Painel intermediário: Como o painel inferior, mas para calibração de $Z - N2O2$ proposta por [Castro et al. \(2017\)](#) (Equação 4.7). Painel superior: como o painel inferior, mas para estimativas obtidas usando o código HCm de [Pérez-Montero et al. \(2019\)](#) (ver Seção 4.3). Em cada painel a média e o desvio padrão desta são mostrados. A área tracejada indica a incerteza de ± 0.1 dex assumida em estimativas Z utilizando métodos de linhas fortes ([DENICOLÓ; TERLEVICH; TERLEVICH, 2002](#)).



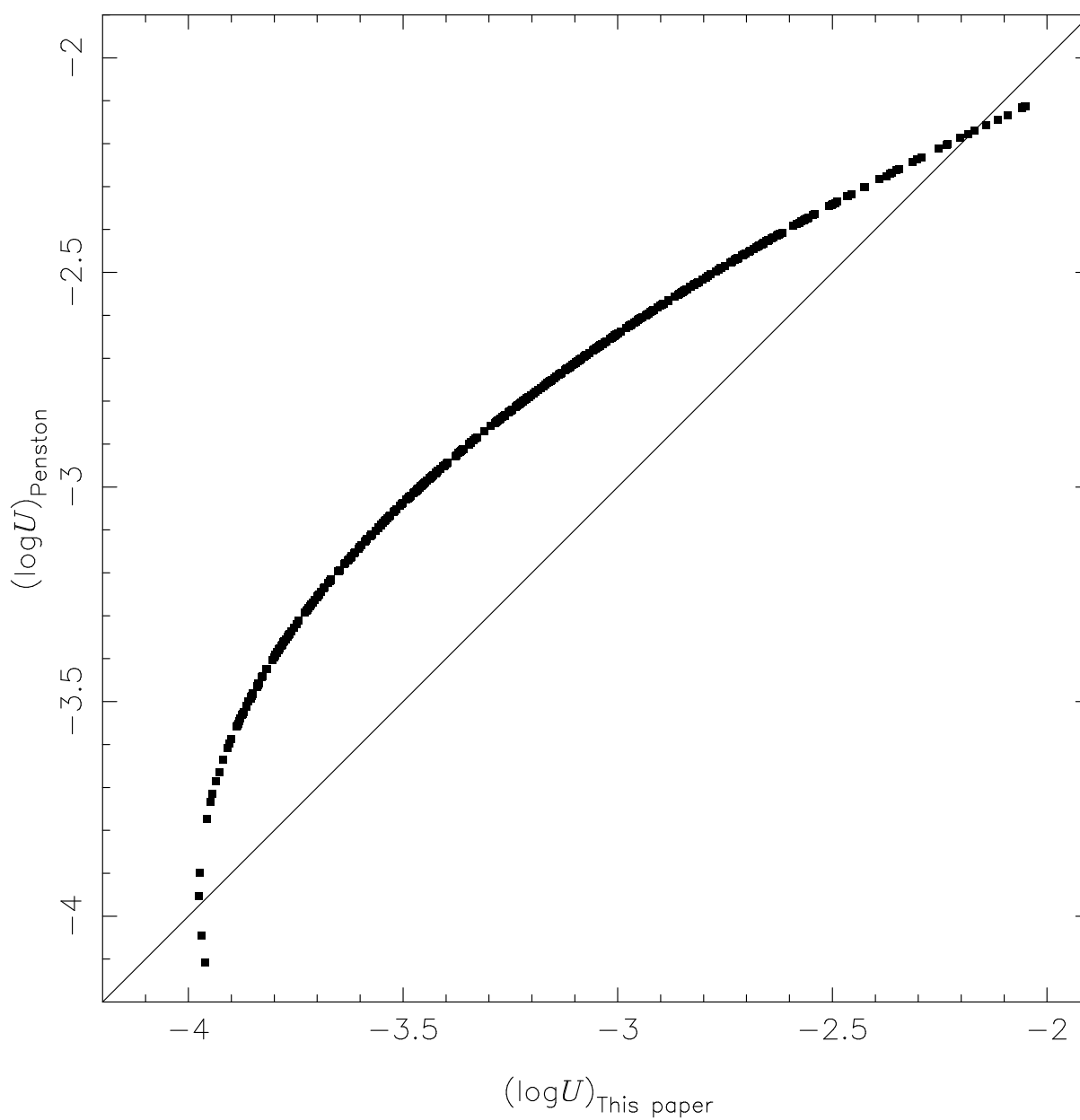
Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 21 – Comparação entre as relações (N/O)-(O/H) assumidas nos modelos de fotoionização neste trabalho (linha vermelha, Equação 2.7), por [Storchi-Bergmann et al. \(1998\)](#) (linha preta, Equação 4.1) e por [Castro et al. \(2017\)](#) (linha azul, Equação 4.5).



Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

Figura 22 – Logaritmo do parâmetro de ionização ($\log U$) derivado para a nossa amostra usando a equação proposta por Penston et al. (1990) (Equação 4.8) versus os valores calculados a partir da calibração deste trabalho (Equação 3.2). A linha representa a igualdade entre as estimativas.



Fonte: [Carvalho et al. \(2020\)](#)

5 Conclusão

Neste trabalho propomos uma calibração semi-empírica entre a metalicidade da regiões de linhas estreitas de AGNs tipo Seyfert 2 ($z < 0.4$) e a razão de linhas $N2 = \log([\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$. Para isso, comparamos intensidades de razões de linhas observacionais estreitas obtidas do Sloan Digital Sky Survey e medidas pelo grupo MPA/JHU com resultados de modelos de fotoionização construídos com o código CLOUDY. O uso de $N2$ como indicador de metalicidade de galáxias Seyfert tipo-2 possui várias vantagens sobre o uso de outros indicadores, pois:

1. Não inclui a linha $[\text{O II}]\lambda 3727$, o que torna essa razão de linha muito pouco sensível a correção do avermelhamento e, conseqüentemente, útil para estudos de objetos obscurecidos por poeira.
2. Devido ao fato de $N2$ considerar linhas de emissão com comprimento de onda muito próximo, ele não é afetado por incertezas da calibração de fluxo.
3. É acessível no infravermelho próximo em *redshift* moderado a alto;
4. Possui pouca dependência com o parâmetro de ionização.
5. Não produz valores degenerados de Z em um ampla faixa de metalicidade.
6. Tem uma forte correlação com O/H .

Mediante nossos resultados, encontramos que a relação derivada $Z - N2$ é válida para o intervalo $0.3 \lesssim (Z/Z_{\odot}) \lesssim 2.0$, que corresponde a $-0.7 \lesssim N2 \lesssim 0.6$. Os efeitos de variação do parâmetro de ionização (U), da densidade eletrônica (N_e) e da Distribuição Espectral de Energia (SED) nas estimativas da Z são da ordem da incerteza do erro observacional de $N2$. Este resultado indica a grande confiabilidade de nossa calibração $Z - N2$.

Por fim, também derivamos uma calibração entre o logaritmo do parâmetro de ionização ($\log U$) e a razão da linha $[\text{O III}]\lambda 5007/[\text{O II}]\lambda 3727$, pouco dependente de outros parâmetros nebulares.

Referências

- ALLOIN, D. M. et al. A snapshot of the continuous emission of the active galactic nucleus in ngc 3783 from gamma-ray to radio wavelengths. *Astronomy and Astrophysics. Berlin. Vol. 293, no. 2 (Jan. 1995), p. 293-308*, 1995. Citado na página 15.
- AMBARTSUMYAN, V. Problems of extragalactic research. *Problems of Cosmogeny*, v. 8, p. 2, 1962. Citado na página 18.
- ANTONUCCI, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annual review of astronomy and astrophysics*, v. 31, p. 473–521, 1993. Citado na página 20.
- ASPLUND, M. et al. The chemical composition of the sun. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Annual Reviews, v. 47, p. 481–522, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 55.
- BALDWIN, J. A.; PHILLIPS, M. M.; TERLEVICH, R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 93, n. 551, p. 5, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 23.
- BOWEN, I. S. The origin of the nebulium spectrum. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 120, n. 3022, p. 473–473, 1927. Citado na página 18.
- CARVALHO, S. et al. Chemical abundances of seyfert 2 agns—ii. n2 metallicity calibration based on sdss. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020. Citado 15 vezes nas páginas 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 58, 59 e 60.
- CASTRO, C. S. et al. New metallicity calibration for Seyfert 2 galaxies based on the N2O2 index. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 467, n. 2, p. 1507–1514, 01 2017. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stx150>>. Citado 6 vezes nas páginas 30, 35, 54, 56, 58 e 59.
- CONTINI, M. Evidence of merging in the seyfert galaxy ngc 3393, revealed by modelling the spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 425, n. 2, p. 1205–1214, 2012. Citado na página 14.
- CRESCI, G. et al. The metallicity properties of zcosmos galaxies at $0.2 < z < 0.8$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 421, n. 1, p. 262–269, 2012. Citado na página 53.
- DENICOLÓ, G.; TERLEVICH, R.; TERLEVICH, E. New light on the search for low-metallicity galaxies—i. the n2 calibrator. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 330, n. 1, p. 69–74, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 49, 50, 53, 54 e 58.
- DOPITA, M. et al. A theoretical recalibration of the extragalactic h ii region sequence. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 542, n. 1, p. 224, 2000. Citado na página 55.

DORS, O. et al. New quantitative nitrogen abundance estimations in a sample of seyfert 2 active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Oxford University Press, v. 468, n. 1, p. L113–L117, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 35, 37, 39 e 53.

DORS, O. et al. On the central abundances of active galactic nuclei and star-forming galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 453, n. 4, p. 4102–4111, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 35.

DORS, O.; COPETTI, M. Abundance gradients in a sample of barred spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 437, n. 3, p. 837–847, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

DORS, O.; COPETTI, M. Abundance segregation in virgo spiral galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 452, n. 2, p. 473–480, 2006. Citado na página 36.

DORS, O. et al. Chemical abundances of seyfert 2 agns–i. comparing oxygen abundances from distinct methods using sdss. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 492, n. 1, p. 468–479, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 27, 31, 33, 34, 49 e 54.

DORS, O. et al. Ages and metallicities of circumnuclear star formation regions from gemini ifu observations. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 482, n. 1, p. 59–65, 2008. Citado na página 25.

DORS, O. L. et al. Nature and chemical abundances of a sample of lyman- α emitter objects at high redshift. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 479, n. 2, p. 2294–2307, 2018. Citado na página 35.

DORS, O. L. et al. Metallicity evolution of agns from uv emission lines based on a new index. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 443, n. 2, p. 1291–1300, 2014. Citado na página 35.

DORS, O. L. et al. X-rays as the dominant excitation mechanism of [fe ii] and h2 emission lines in active galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 422, n. 1, p. 252–260, 2012. Citado na página 35.

DWEK, E.; ARENDT, R. G. Dust-gas interactions and the infrared emission from hot astrophysical plasmas. *Annual review of astronomy and astrophysics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 30, n. 1, p. 11–50, 1992. Citado na página 36.

EDMUNDS, M.; PAGEL, B. On the composition of h ii regions in southern galaxies–iii. ngc 2997 and 7793. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press Oxford, UK, v. 211, n. 3, p. 507–519, 1984. Citado na página 29.

FATH, E. A. The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, JSTOR, v. 21, n. 126, p. 138–143, 1909. Citado na página 17.

FELTRE, A.; CHARLOT, S.; GUTKIN, J. Nuclear activity versus star formation: emission-line diagnostics at ultraviolet and optical wavelengths. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 456, n. 3, p. 3354–3374, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 23, 35, 36, 38 e 39.

FERLAND, G. et al. The 2017 release of cloudy. *arXiv preprint arXiv:1705.10877*, 2017. Citado na página 35.

FERLAND, G. et al. The 2013 release of cloudy. *Revista mexicana de astronomía y astrofísica*, Instituto de Astronomía, v. 49, n. 1, p. 137–163, 2013. Citado na página 29.

FRANCIS, P. et al. A high signal-to-noise ratio composite quasar spectrum. *American Astronomical Society*, 1991. Citado na página 16.

GROVES, B. A.; DOPITA, M. A.; SUTHERLAND, R. S. Dusty, radiation pressure-dominated photoionization. ii. multiwavelength emission line diagnostics for narrow-line regions. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 153, n. 1, p. 75, 2004. Citado na página 39.

HO, L. C. The spectral energy distributions of low-luminosity active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 516, n. 2, p. 672, 1999. Citado na página 35.

HUGGINS, W. Xiii. on the spectra of some of the nebulae. a supplement to the paper “on the spectra of some of the fixed stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, The Royal Society London, n. 154, p. 437–444, 1864. Citado na página 18.

KAUFFMANN, C. et al. The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 346, n. 4, p. 1055–1077, 12 2003. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 31.

KAUFFMANN TREMONTI, C. A. et al. The origin of the mass-metallicity relation: insights from 53,000 star-forming galaxies in the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 613, n. 2, p. 898, 2004. Citado na página 31.

KENNICUTT, R. C.; BRESOLIN, F.; GARNETT, D. R. The composition gradient in m101 revisited. ii. electron temperatures and implications for the nebular abundance scale. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 591, n. 2, p. 801, 2003. Citado na página 49.

KEWLEY, L. J. et al. Theoretical modeling of starburst galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 556, n. 1, p. 121–140, jul 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086%2F321545>>. Citado 3 vezes nas páginas 31, 33 e 34.

KEWLEY, L. J. et al. The host galaxies and classification of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 372, n. 3, p. 961–976, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 32.

KEWLEY, L. J. et al. The cosmic bpt diagram: confronting theory with observations. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 774, n. 1, p. L10, 2013. Citado na página 32.

KHACHIKIAN, E. Y. On the activity of the nuclei of galaxies. In: *Stars and star systems*. [S.l.]: Springer, 1979. p. 107–122. Citado na página 18.

KÖPPEN, J.; HENSLER, G. Effects of episodic gas infall on the chemical abundances in galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 434, n. 2, p. 531–541, 2005. Citado na página 36.

- LIANG, Y.-C. et al. The oxygen abundance calibrations and n/o abundance ratios of 40,000 sdss star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 652, n. 1, p. 257, 2006. Citado na página 53.
- MARINO, R. A. et al. The o3n2 and n2 abundance indicators revisited: improved calibrations based on califa and te-based literature data. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 559, p. A114, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.
- MATSUOKA, K. et al. Chemical evolution of high-redshift radio galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 503, n. 3, p. 721–730, 2009. Citado na página 36.
- MATSUOKA, K. et al. The mass-metallicity relation of high-z type-2 active galactic nuclei. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 616, p. L4, 2018. Citado na página 35.
- MCGAUGH, S. S. H ii region abundances-model oxygen line ratios. *The Astrophysical Journal*, v. 380, p. 140–150, 1991. Citado na página 29.
- MCKERNAN, B.; FORD, K.; REYNOLDS, C. Black hole mass, host galaxy classification and agn activity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 407, n. 4, p. 2399–2410, 2010. Citado na página 16.
- MIGNOLI, M. et al. Obscured agn at $1.5 < z < 3.0$ from the zcosmos-deep survey-i. properties of the emitting gas in the narrow-line region. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 626, p. A9, 2019. Citado na página 35.
- MILLER, B. P. et al. X-ray emission from optically selected radio-intermediate and radio-loud quasars. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 726, n. 1, p. 20, 2010. Citado na página 35.
- MOLLÁ, M.; DÍAZ, A. I. A grid of chemical evolution models as a tool to interpret spiral and irregular galaxies data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 358, n. 2, p. 521–543, 2005. Citado na página 25.
- MORALES-LUIS, A. et al. On the use of the index n2 to derive the metallicity in metal-poor galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 797, n. 2, p. 81, 2014. Citado na página 53.
- NAGAO, T.; MAIOLINO, R.; MARCONI, A. Gas metallicity diagnostics in star-forming galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 459, n. 1, p. 85–101, 2006. Citado na página 53.
- NAGAO, T.; MAIOLINO, R.; MARCONI, A. Gas metallicity in the narrow-line regions of high-redshift active galactic nuclei. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 447, n. 3, p. 863–876, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 49.
- O'DONNELL, J. E. Rnu-dependent optical and near-ultraviolet extinction. *The Astrophysical Journal*, v. 422, p. 158–163, 1994. Citado na página 31.
- PAGEL, B. E. J. et al. On the composition of H II regions in southern galaxies – I. NGC 300 and 1365. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 189, n. 1, p. 95–113, 11 1979. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/189-1.95>>. Citado na página 29.

- PEIMBERT, A.; PEIMBERT, M. On the o/h, mg/h, si/h, and fe/h gas and dust abundance ratios in galactic and extragalactic h ii regions. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 724, n. 1, p. 791, 2010. Citado na página 36.
- PEIMBERT, M.; COSTERO, R. Chemical abundances in galactic hii regions. *Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya*, v. 5, p. 3–22, 1969. Citado na página 28.
- PENSTON, M. et al. The extended narrow line region of ngc 4151. i. emission line ratios and their implications. EDP Sciences, 1990. Citado 3 vezes nas páginas 9, 57 e 60.
- PÉREZ-MONTERO, E.; CONTINI, T. The impact of the nitrogen-to-oxygen ratio on ionized nebula diagnostics based on [n ii] emission lines. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 398, n. 2, p. 949–960, 2009. Citado na página 53.
- PÉREZ-MONTERO, E. et al. The cosmic evolution of oxygen and nitrogen abundances in star-forming galaxies over the past 10 gyr. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 549, p. A25, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 56.
- PÉREZ-MONTERO, E. et al. A bayesian-like approach to derive chemical abundances in type-2 active galactic nuclei based on photoionization models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 489, n. 2, p. 2652–2668, 2019. Citado 6 vezes nas páginas 31, 35, 39, 54, 56 e 58.
- PETTINI, M.; PAGEL, B. E. [o iii]/[n ii] as an abundance indicator at high redshift. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 348, n. 3, p. L59–L63, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 53.
- PILYUGIN, L. On the oxygen abundance determination in hii regions: the problem of the line intensities–oxygen abundance calibration. *arXiv preprint astro-ph/0004032*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 53.
- PILYUGIN, L. The oxygen abundance distribution in m 101. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 373, n. 1, p. 56–62, 2001. Citado na página 53.
- PILYUGIN, L.; GREBEL, E. New calibrations for abundance determinations in h ii regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 457, n. 4, p. 3678–3692, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 37.
- PILYUGIN, L. S.; GREBEL, E. K.; MATTSSON, L. ‘counterpart’ method for abundance determinations in h ii regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 424, n. 3, p. 2316–2329, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 37.
- PRIETO, C. A.; LAMBERT, D. L.; ASPLUND, M. The forbidden abundance of oxygen in the sun. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 556, n. 1, p. L63, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 55.
- QUEYREL, J. et al. Massiv: Mass assembly survey with sinfoni in vvds-iii. evidence for positive metallicity gradients in $z \sim 1.2$ star-forming galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 539, p. A93, 2012. Citado na página 53.

- RAIMANN, D. et al. Gas properties of h ii and starburst galaxies: relation with the stellar population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 316, n. 3, p. 559–568, 2000. Citado na página 53.
- REES, M. J. Black hole models for active galactic nuclei. *Annual review of astronomy and astrophysics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 22, n. 1, p. 471–506, 1984. Citado na página 16.
- REVALSKI, M. et al. Quantifying feedback from narrow line region outflows in nearby active galaxies. ii. spatially resolved mass outflow rates for the qso2 markarian 34. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 867, n. 2, p. 88, 2018. Citado na página 22.
- RIFFEL, R. A. et al. Agn–starburst connection in ngc 7582: Gemini near-infrared spectrograph integral field unit observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 393, n. 3, p. 783–797, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- ROBINSON, A. et al. Emission-line activity in radio galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 227, n. 1, p. 97–114, 1987. Citado na página 57.
- SÁNCHEZ, S. et al. Sdss iv manga-properties of agn host galaxies. *arXiv preprint arXiv:1709.05438*, 2017. Citado na página 14.
- SEYFERT, C. K. Nuclear emission in spiral nebulae. *The Astrophysical Journal*, v. 97, p. 28, 1943. Citado na página 18.
- SKILLMAN, E. D.; KENNICUTT, R.; HODGE, P. Oxygen abundances in nearby dwarf irregular galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 347, p. 875–882, 1989. Citado na página 29.
- SLIPHER, V. M. Nebulae. *Proceedings of the American Philosophical Society*, JSTOR, p. 403–409, 1917. Citado na página 18.
- STASIŃSKA, G. et al. Semi-empirical analysis of sloan digital sky survey galaxies–iii. how to distinguish agn hosts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 371, n. 2, p. 972–982, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 53.
- STORCHI-BERGMANN, T.; CALZETTI, D.; KINNEY, A. L. Ultraviolet to near-infrared spectral distributions of star-forming galaxies: Metallicity and age effects. *The astrophysical journal. Chicago. Vol. 429, no. 2, pt. 1 (July 1994), p. 572-581*, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 29, 53 e 54.
- STORCHI-BERGMANN, T. et al. Chemical abundance calibrations for the narrow-line region of active galaxies. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 115, n. 3, p. 909, 1998. Citado 7 vezes nas páginas 29, 30, 54, 55, 56, 58 e 59.
- THOMAS, A. D. et al. The mass–metallicity relation of local active galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 874, n. 1, p. 100, 2019. Citado na página 35.
- VAONA, L. et al. Spectral properties of the narrow-line region in seyfert galaxies selected from the sdss-dr7. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 427, n. 2, p. 1266–1283, 2012. Citado na página 38.

- VILA-COSTAS, M.; EDMUNDS, M. The nitrogen-to-oxygen ratio in galaxies and its implications for the origin of nitrogen. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press Oxford, UK, v. 265, n. 1, p. 199–212, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 54.
- VINCENZO, F.; KOBAYASHI, C. Evolution of n/o ratios in galaxies from cosmological hydrodynamical simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 478, n. 1, p. 155–166, 2018. Citado na página 36.
- XIAO, T. et al. Dust reddening in star-forming galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 421, n. 1, p. 486–501, 2012. Citado na página 53.
- YANG, G. et al. Linking black hole growth with host galaxies: the accretion–stellar mass relation and its cosmic evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 475, n. 2, p. 1887–1911, 2017. Citado na página 16.
- YIN, S. et al. Empirical strong-line oxygen abundance calibrations from galaxies with electron-temperature measurements. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 462, n. 2, p. 535–546, 2007. Citado na página 53.
- YORK, D. G. et al. The sloan digital sky survey: Technical summary. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 120, n. 3, p. 1579, 2000. Citado na página 31.
- ZHANG, Z.; LIANG, Y.; HAMMER, F. Modelling the narrow-line regions of active galaxies in the sloan digital sky survey–i. sample selection and physical conditions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Narnia, v. 430, n. 4, p. 2605–2621, 2013. Citado na página 38.
- ZHU, S. F. et al. Investigating the x-ray enhancements of highly radio-loud quasars at $z > 4$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 482, n. 2, p. 2016–2038, 2019. Citado na página 35.