

Vinicius de Abreu Oliveira

*VARIAÇÕES ESPACIAIS DE
TEMPERATURA E DENSIDADE
ELETRÔNICA DE REGIÕES HII NAS
NUVENS DE MAGALHÃES*

Santa Maria, RS, Brasil

2009

Vinicius de Abreu Oliveira

***VARIAÇÕES ESPACIAIS DE
TEMPERATURA E DENSIDADE
ELETRÔNICA DE REGIÕES HII NAS
NUVENS DE MAGALHÃES***

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Contração em Astronomia, na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Física**.

Orientador: Prof. Dr. Marcus V. F. Copetti

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Santa Maria, RS, Brasil

2009

Dedicatória

*A minha filha muito amada . . .
estrela padrão do meu universo.*

*À Paula Kielse, minha amiga fiel
e eterna incentivadora.*

*Ao meu pai, um grande ídolo
que tenho na vida.*

Agradecimentos

Início pela pessoa que tornou esta realização possível, meu orientador prof. Dr. Marcus V. F. Copetti. Agradeço pelos valiosos ensinamentos, mas acima de tudo, pela amizade construída durante esses anos de convivência.

Se o Copetti foi a pessoa que me aceitou, o Programa de Pós-Graduação em Física da UFSM foi a entidade que o fez. Representado por três coordenadores durante estes anos: Profs. Drs. Paulo Piquini, Sérgio Magalhães e Luiz Fernando Schelp, e pela Saionara, secretária da Pós-Graduação.

E claro temos a CAPES, que foi a entidade que me financiou durante estes anos.

Não poderia deixar de agradecer aos demais professores do LANA – Laboratório de Análises Numéricas e Astrofísica – prof^{as}. Dr^{as}. Maria Inês Copetti e Alice Kozakevicius e ao prof. Dr. Alex Schmidt, por toda a contribuição pessoal e profissional.

Minhas pequenas foram, e sempre serão, uma constante na minha vida. Carol e Paula Kielse, sem o apoio e auxílio de vocês – em todos os níveis imagináveis – a estrada teria sido bem mais longa. Contem comigo sempre!

Falando em pessoas constantes na minha vida, lembro dos meus pais, José Maria e Izabel Judith, que mesmo com a distância sempre se fizeram presentes! Não tenho palavras para descrever o quanto vocês são importantes para mim. Assim como meu irmão Otávio e minha querida sobrinha Julia, que fazem parte da minha vida.

E ainda, como diriam os franceses na minha “belle famille”, agradeço a rica amizade do meu eterno sogrão Davi Júlio e da Vânia Maria. Nessa levada, agradeço aos irmãos aparentado Andrey e Cláudio, suas esposas Nayane e Lili, e minhas sobrinhas Raquel e Ana Luiza ... pessoas fantásticas que considero muito!

Obrigado por tudo Ângela – a dinda – é muito gratificante ter sua amizade. Os ex-colegas de laboratório Tiago, Oli e David, cada qual do seu modo, conquistaram minha profunda admiração. E os atuais Aline, Diogo, Guilherme e Márcio, pela troca de vivência e conhecimentos. Opa, temos o mais novo integrante Hélio ... este guri vai longe!

Igor e Hekatelyne, não há palavras que expressem o valor da amizade consolidada ao término da minha trajetória acadêmica. Meus ternos agradecimentos.

Tem aqueles que de uma maneira indireta influenciariam e me auxiliaram nesta jornada, entre eles: Anastácia (vó), André, Antônio, Celso, Cezar, Cuca, Daniel, Eduardo, Evaldo Braz, Fabrícia, Fran, Fred, Fluminense Futebol Clube, Herval, Ingrid, Jaci, Jefferson, Júlio, Leandro, Loide Júlia, Luciane, Lúcio, Melisa, Patrícia, Paulo Bairros, Paulo Vitor, Paulo, Rosa, Tales, Tati, Tiéle, Saul, Vinicius.

Minha eterna sogra, Sirlei Vargas (*in memoriam*). Lembro com saudades de sua alegria, vivacidade e força. Depois da queda levanta-te ... uma mulher guerreira que será para sempre uma fonte de inspiração ... esta de sogra tinha apenas o título!

“Finis coronat opus”

Obrigado a todos.

Todo o nosso universo estava em um estado quente e denso, então há quase 14 bilhões de anos atrás a expansão começou...
A Terra começou a esfriar, os autótrofos começaram a babar, os neandertais desenvolveram ferramentas, construímos a muralha, construímos as pirâmides, a matemática, a ciência, a história, desvendando o mistério de que tudo começou com um Big Bang!

Texto inicial do seriado norte-americano "The Big Bang Theory"

Resumo

O objetivo desse trabalho foi estimar as propriedades físicas da região H II NGC 346 (pertencente a Pequena Nuvem de Magalhães) e a estimativa de densidade eletrônica ponto-a-ponto para outras 17 nebulosas ionizadas, tanto da Grande quanto da Pequena Nuvem de Magalhães. Foram utilizadas imagens espectroscópicas de fenda longa com alto sinal ruído na região do vermelho (6 000 a 7 000 Å), e do azul (4 000 a 5 000 Å) apenas para NGC 346, ambas as regiões no ótico. O sensor de temperatura eletrônica utilizado foi a razão de linhas do [O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$, a densidade eletrônica foi obtida por meio da razão de linhas do [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$. Para NGC 346 tem-se que os valores de temperatura eletrônica foram relativamente homogêneos, com média ponderada por fluxo em H β de 12 269 K (6,1% de dispersão). As flutuações superficiais de temperatura foram de $t_s^2 \approx 0,0021$ (dispersão de 4,5%), e o parâmetro de flutuações de temperatura (t^2) de aproximadamente 0,0082 (dispersão de 9,2%). Os resultados obtidos para a baixa dispersão de temperatura eletrônica e flutuações superficiais de temperatura concordam com os valores das variações em larga escala dos modelos de fotoionização. Contudo, tais resultados são insuficientes para explicar o problema da discrepância dos valores de abundância química. A dispersão de densidade eletrônica foi de 13,5% da média ponderada pelo fluxo em H α ($54,18 \text{ cm}^{-3}$). Para as demais regiões H II estudadas obteve-se uma densidade eletrônica mediana individual relativamente baixa, menor que 100 cm^{-3} para a maioria dos objetos e algumas posições sobre 30 Doradus. Observa-se que alguns perfis apresentam uma forma aproximadamente gaussiana para a distribuição de densidade, sugerindo uma expansão livre do gás ionizado no meio interestelar, como exemplo tem-se os perfis de GNM: N160 A (ambas posições) e PNM: N88 (PA = 90°). A ocorrência de um gradiente de densidade eletrônica nos perfis pode indicar a existência do efeito champagne, um leve gradiente pôde ser percebido para 30 Doradus (PA = 10° e 24°) e GNM: N11 E. Ou ainda, uma queda abrupta na densidade eletrônica também sugere a existência de tal efeito, pois esta queda abrupta pode ser entendida pela ação de freamento do gás ionizado em seu movimento em direção a uma nuvem molecular. Esta ocorrência foi evidenciada nos perfis de 30 Doradus (PA = 26° e 10°), GNM: N4 A, GNM: N11 B, PNM: N81, PNM: N83 A,C (ambas posições) e PNM: N88 (PA = 106°). Estes objetos se destacam como alvo para estudos mais detalhados para o maior entendimento das estruturas dinâmicas de nebulosas ionizadas.

Abstract

The aim of this work had to estimate the physical proprieties of the H II region NGC 346 (belonging the Small Magellanic Cloud) and the estimation of electron density at point-to-point to 17 other ionized nebulae, in Magellanic Cloud. We were used spectroscopic images of a long slit with high signal noise in the optical region, at red (6 000 to 7 000 Å), and at blue (4 000 to 5 000 Å), this only for NGC 346. The [O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$ emission line ratio was used like electron temperature sensor, and for electron density we used the [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$ emission line ratio. For NGC 346, we found a relative homogeneity to distribution of electron temperature, with an average weighted by the H β flux of 12 269 K (equivalent to a dispersion of 6,1%). We estimated the spatial temperature fluctuation $t_s^2 \approx 0,0021$ (equivalent to a dispersion of 4,5%), and the temperature fluctuation parameter of 0,0082 (9,2% of dispersion). The magnitude of the temperature fluctuations observed is in agreement with the large scale variations in temperature predicted by standard photoionization models, but is too low to explain the abundance discrepancy problem. By contrast, we found a mean value weighted by the H α flux for the electron density of 54,18 cm^{-3} with a dispersion of 13,5%. For the others H II regions studied, we obtained a individual mean electron density relatively low, less than 100 cm^{-3} for most of the objects and some positions on 30 Doradus. Some profiles have a roughly Gaussian shape for the density distribution, that suggest a free expansion of ionized gas into the interstellar medium, such as the profile of LMC: N160 A (both positions) and SMC: N88 (PA = 90°). A gradient of electron density could indicate the existence of champagne effect, we indentified a light gradient of density on 30 Doradus (PA = 10° and 24°) and LMC: N11 E profiles. Moreover, a variation abruptly in electron density can be understood by the braking action of the ionized gas in its movement toward a molecular cloud. This was evidenced on 30 Doradus (PA = 26° and 10°), LMC: N4 A, LMC: N11 B, SMC: N81, SMC: N83 A,C (both positions) and SMC: N88 (PA = 106°) profiles. These objects stand out as a target for more detailed studies for the greater understanding of the dynamic structures of ionized nebulae.

Lista de Figuras

1	Diagrama dos níveis de energia para a configuração p^3 de [S II]	p. 18
2	Intervalo de convergência do modelo de átomos de 5 níveis para a densidade eletrônica.	p. 19
3	Diagrama dos níveis de energia para a configuração p^2 de [O III]	p. 20
4	Intensidade da razão de linhas do [O III] em função da temperatura eletrônica.	p. 21
5	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II NGC 346.	p. 37
6	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: 30 Doradus.	p. 38
7	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N4 A.	p. 39
8	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 B.	p. 39
9	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 C.	p. 40
10	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 E.	p. 40
11	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 F.	p. 41
12	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 G.	p. 41
13	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 I.	p. 42
14	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 K.	p. 42
15	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N44 D.	p. 43
16	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N160 A.	p. 43
17	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N13.	p. 44

18	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N63.	p. 44
19	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N77 A.	p. 45
20	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N81.	p. 45
21	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N83 A,C.	p. 46
22	Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N88.	p. 46
23	Espectro de NGC 346 na região do azul (4060 a 5070 Å)	p. 50
24	Espectro de NGC 346 na região do vermelho (5080 a 6900 Å)	p. 51
25	Perfis espaciais para NGC 346 na posição de fenda de 30" N	p. 60
26	Perfis espaciais para NGC 346 na posição de fenda de 0"	p. 61
27	Perfis espaciais para NGC 346 na posição de fenda de 30" S	p. 62
28	Perfis de temperatura eletrônica para NGC 346 com a regressão linear.	p. 64
29	Representação das posições de fenda em NGC 346 pelos diversos autores pesquisados na literatura.	p. 65
30	Comparação entre os perfis de temperatura eletrônica e a regressão linear para a região H II NGC 346.	p. 67
31	Mapa superficial de densidade eletrônica para a Região H II NGC 346	p. 71
32	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 10° em 30 Doradus	p. 75
33	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 24° em 30 Doradus	p. 76
34	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 26° em 30 Doradus	p. 77
35	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 106° em 30 Doradus	p. 78
36	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 166° em 30 Doradus	p. 79
37	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 30" N sobre 30 Doradus	p. 80
38	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 20" N sobre 30 Doradus	p. 81
39	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 15" N sobre 30 Doradus	p. 82
40	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 10" N sobre 30 Doradus	p. 83
41	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 5" N sobre 30 Doradus	p. 84

42	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 0" sobre 30 Doradus	p. 85
43	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 5" S sobre 30 Doradus	p. 86
44	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em 10" S sobre 30 Doradus	p. 87
45	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 14° em GNM: N4 A . . .	p. 91
46	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N11 B . .	p. 92
47	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N11 C . .	p. 93
48	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N11 E . .	p. 94
49	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N11 F . .	p. 95
50	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N11 G . .	p. 96
51	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N11 I . . .	p. 97
52	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N11 K . .	p. 98
53	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em GNM: N4 D . . .	p. 99
54	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 38° em GNM: N160 A . .	p. 100
55	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 72° em GNM: N160 A . .	p. 101
56	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em PNM: N13	p. 105
57	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em PNM: N63	p. 106
58	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em PNM: N77 A . .	p. 107
59	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 106° em PNM: N81	p. 108
60	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 50° em PNM: N83 A,C .	p. 109
61	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em PNM: N83 A,C .	p. 110
62	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90° em PNM: N88	p. 111
63	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 106° em PNM: N88	p. 112
64	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90°, $\Delta\delta = 40''$ N em PNM: NGC 346	p. 114
65	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90°, $\Delta\delta = 35''$ N em PNM: NGC 346	p. 115
66	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90°, $\Delta\delta = 30''$ N em PNM: NGC 346	p. 116
67	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90°, $\Delta\delta = 25''$ N em PNM: NGC 346	p. 117
68	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90°, $\Delta\delta = 40''$ N em PNM: NGC 346	p. 118
69	Perfis espaciais para a posição de fenda PA = 90°, $\Delta\delta = 40''$ N em PNM: NGC 346	p. 119

70	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 40''$ N em PNM: NGC 346	p. 120
71	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 5''$ N em PNM: NGC 346	p. 121
72	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 0''$ em PNM: NGC 346	p. 122
73	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 5''$ S em PNM: NGC 346	p. 123
74	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 10''$ S em PNM: NGC 346	p. 124
75	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 15''$ S em PNM: NGC 346	p. 125
76	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 20''$ S em PNM: NGC 346	p. 126
77	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 25''$ S em PNM: NGC 346	p. 127
78	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 30''$ S em PNM: NGC 346	p. 128
79	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 35''$ S em PNM: NGC 346	p. 129
80	Perfis espaciais para a posição de fenda $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 40''$ S em PNM: NGC 346	p. 130
81	Regressão Linear na posição $30''$ N sobre PNM: NGC 346.	p. 143
82	Imagem em cor falsa da região H II PNM: NGC 346	p. 145
83	Mosaico de imagens em cor falsa da região H II 30 Doradus	p. 146
84	Imagem em cor falsa do complexo gigante GNM: N11	p. 147
85	Imagem em cor falsa da complexo GNM: N44	p. 148
86	Imagem em cor falsa da região H II GNM: N160 A	p. 149
87	Imagem em cor falsa da região H II PNM: N81	p. 150

Lista de Tabelas

1	Coordenadas no sistema equatorial e galácticas das regiões H II observadas	p. 26
2	Resumo das observações espectroscópica de NGC 346 realizadas nos três turnos de observação, com uso do telescópio de 1,60 m do OPD	p. 47
3	Resumo das observações espectroscópica realizadas para as demais regiões H II, com uso do telescópio de 1,60 m e de 0,60 m do OPD	p. 48
4	Principais linhas de emissão observadas e medidas sobre a região H II NGC 346	p. 54
5	Temperatura eletrônica utilizada nas estimativas de densidade eletrônica. Valores obtidos na literatura	p. 56
6	Resumo da estatística para a razão de linhas do [O III] e a temperatura eletrônica de NGC 346	p. 59
7	Regressão linear ponderada das medidas de temperatura eletrônica de NGC 346.	p. 63
8	Valores recalculados de temperatura eletrônica para NGC 346 utilizando as razões de linhas encontradas na literatura	p. 66
9	Comparação das temperaturas eletrônicas recalculadas com os dados de Peimbert <i>et al.</i> (2000) e os do trabalho atual degradadas	p. 68
10	Resumo da estatística para a razão de linhas do [S II] para as 18 nebulosas observadas	p. 73
11	Resumo da estatística para a densidade eletrônica para as 18 nebulosas observadas	p. 74
12	Densidade eletrônica recalculada utilizando razões de linhas encontrados na literatura	p. 113

Lista de Abreviações

- α , ascensão reta (coordenada do sistema equatorial);
- AAO, Observatório Anglo-Australiano (*Anglo-Australian Observatory*);
- ADF, fator de discrepância da abundância (*Abundance Discrepance Factor*);
- CCD, dispositivo de carga acoplada (*Charge Coupled Device*);
- δ , declinação (coordenada do sistema equatorial);
- $\Delta\delta$, variação da posição da fenda na direção Norte-Sul, em segundos de arco;
- erg, 1 erg equivale a $1,0 \times 10^{-7}$ J;
- eV, elétron-Volt, 1 eV equivale a $1,60 \times 10^{-19}$ J;
- DSS1, Pesquisa Digitalizada do Céu 1 (*Digitalized Sky Survey 1*);
- DSS2, Pesquisa Digitalizada do Céu 2 (*Digitalized Sky Survey 2*);
- FWHM, largura a meia altura (*Full Width at Half Maximum*);
- GNM, Grande Nuvem de Magalhães;
- IRAF, *Image Reduction and Analysis Facility*;
- LNA, Laboratório Nacional de Astrofísica;
- LSR, local padrão de repouso (*Local Standard of Rest*);
- M_{\odot} , massa solar, 1 M_{\odot} equivale a $1,99 \times 10^{30}$ kg;
- OPD, Observatório Pico dos Dias;
- PA, ângulo de posição da fenda (*position angle*), PA = 90° indica alinhamento na direção Leste-Oeste;
- pc, parsec, 1 pc equivale a 3,26 anos-luz ou $3,0856 \times 10^{13}$ km;
- PNM, Pequena Nuvem de Magalhães;
- RMS, raiz quadrada média (*Root Mean Square*);
- SERC, Conselho de Pesquisa em Engenharia e Ciência (*Science and Engineering Research Council*);

Sumário

1	Introdução	p. 15
1.1	Propriedades físicas em regiões H II	p. 16
1.1.1	Densidade eletrônica	p. 17
1.1.2	Temperatura eletrônica	p. 19
1.2	Flutuações de temperatura eletrônica	p. 21
1.3	Objetivos do estudo	p. 24
2	Revisão Bibliográfica	p. 26
2.1	NGC 346	p. 26
2.2	30 Doradus	p. 29
2.3	GNM: N4 A	p. 29
2.4	GNM: Complexo N11	p. 30
2.5	GNM: N44 D	p. 31
2.6	GNM: N160 A	p. 31
2.7	PNM: N13	p. 32
2.8	PNM: N63 e PNM: N77	p. 32
2.9	PNM: N81	p. 32
2.10	PNM: N83 A,C	p. 33
2.11	PNM: N88	p. 33
3	Observação, Redução e Medidas das Linhas de Emissão	p. 35
3.1	Coleta dos dados	p. 35
3.2	Redução dos dados	p. 47
3.3	Medidas do fluxo das linhas de emissão	p. 50
3.3.1	Correção por avermelhamento	p. 52
3.3.2	Fluxos corrigidos das linhas de emissão	p. 54
3.4	Densidade eletrônica	p. 55

3.5	Temperatura eletrônica	p. 55
3.6	Mapa superficial	p. 57
4	Resultados e Discussões	p. 58
4.1	Propriedades físicas de NGC 346	p. 58
4.1.1	Análise estatística da temperatura eletrônica	p. 58
4.1.2	Flutuações de temperatura eletrônica	p. 68
4.1.3	Mapa superficial de densidade eletrônica	p. 70
4.2	Perfil Espacial de densidade eletrônica em 18 Regiões H II nas Nuvens de Magalhães	p. 70
4.2.1	Análise estatística da densidade eletrônica	p. 72
5	Considerações Finais	p. 131
5.1	Sugestões e perspectivas futuras	p. 132
	Referências	p. 133
	Apêndice A – Regressão Linear Ponderada	p. 138
A.1	Média e desvio padrão ponderados	p. 138
A.2	Regressão linear ponderada	p. 139
A.2.1	Coefficiente de correlação e intervalo de previsão	p. 141
A.2.2	Faixas dos intervalos de confiança e previsão	p. 142
A.2.3	Exemplo	p. 142
	Apêndice B – Imagens em Cores de Algumas Nebulosas Observadas	p. 144

1 *Introdução*

As Nuvens de Magalhães foram avistadas e identificadas pelo navegador português Fernão de Magalhães (1480-1521), durante sua viagem de circum-navegação, possivelmente no ano de 1520. Na realidade, anterior a esse período, os povos nativos da Austrália e da América do Sul possuíam referências explícitas às Nuvens de Magalhães em suas lendas e mitos. As Nuvens de Magalhães também foram percebidas por muitos dos marinheiros, em viagens pelo hemisfério sul na fase inicial da Era das Grandes Navegações, denominando-as por Nuvens do Cabo, numa referência ao Cabo da Boa Esperança, atual África do Sul.

A nomenclatura atual desses objetos foi adotada partindo do relato de Antonio Pigafetta, membro da tripulação de Fernão de Magalhães, na qual descreveu as Nuvens como um conjunto de pequenas estrelas pouco brilhantes, agrupadas em forma similar a duas nuvens ligeiramente separadas entre si. Posteriormente, as Nuvens do Cabo passaram a ser designadas por Nuvens de Magalhães em homenagem ao navegador que empreendeu, com a ajuda da Espanha, a viagem que comprovou o fato que a Terra é redonda. Contudo, a confirmação de que as Nuvens de Magalhães seriam duas outras galáxias vizinhas à Via Láctea e não pertencentes a ela, ocorreu somente no início do século XX, com os trabalhos de Henrietta Leavitt e Edwin Hubble.

Por serem objetos extragalácticos próximos e de tamanho considerável, as Nuvens de Magalhães fornecem importantes informações a sobre formação, a evolução estelar e química de galáxias. A Grande Nuvem de Magalhães (GNM) se encontra a uma distância heliocêntrica aproximada de 50 kpc (PANAGIA *et al.*, 1991), e a Pequena Nuvem de Magalhães (PNM), a cerca de 61 kpc (HILDITCH *et al.*, 2005), sendo classificadas como irregulares, por não possuírem forma definida (espiral ou elíptica). A GNM e a PNM pertencem ao Grupo Local, constituído de um conjunto de galáxias interagindo gravitacionalmente em torno de um centro de massa comum, e dominado por duas galáxias espirais gigantes, a Via Láctea e Andrômeda. Esse conjunto de galáxias apresenta uma grande quantidade de membros, especialmente de baixa massa, tendo como objeto extragaláctico mais próximo a galáxia anã do Cão Maior, situada na constelação de mesmo

nome (MARTIN *et al.*, 2004).

O estudo de regiões H II em galáxias irregulares, tais como as Nuvens de Magalhães, são interessantes por serem muito abundantes neste tipo de galáxia, sendo utilizadas para a determinação das propriedades físicas gerais da galáxia. Regiões H II são nebulosas gasosas ionizadas por uma ou mais estrelas de temperatura efetiva em torno de 40 000 K. O principal elemento encontrado no gás é o Hidrogênio (H) com cerca de 90% em número de átomos, seguido pelo Hélio (He) com aproximadamente 10% e, em menores quantidades, vários outros elementos. Valores típicos de propriedades físicas nestas nebulosas são uma temperatura eletrônica (T_e) de aproximadamente 10 000 K e uma densidade eletrônica (N_e) entre 100 cm^{-3} a $1 000 \text{ cm}^{-3}$, aproximadamente. Morfologicamente tem-se desde regiões H II de pequeno porte, com dimensões inferiores a 1 pc, até gigantes, com cerca de 100 pc. A massa de uma região H II clássica é da ordem de 10^2 a $10^4 M_\odot$.

É comum encontrar regiões H II associadas a nuvens moleculares, sendo frequentemente relacionadas como regiões formadoras de estrelas, pois as estrelas ionizantes encontradas são jovens com menos de 10 milhões de anos e ainda estando na seqüência principal.

Quando a região H II se encontra próxima ao limite externo de uma nuvem molecular, sua expansão será não isotrópica, e tem-se a ocorrência do efeito champagne. Isto é, a expansão do gás ionizado ocorre com velocidades diferentes conforme a direção de propagação, sendo maiores para fora da nuvem molecular, em direção ao meio interestelar mais rarefeito, por este apresentar menos resistência ao movimento (TENORIO-TAGLE, 1979).

Uma característica importante observada nos espectros de nebulosas gasosas é a presença de intensas linhas de emissão sobrepostas a um fraco contínuo, destacando-se as linhas de recombinação do H e He. Existem ainda linhas de metais (na Astronomia são todos os elementos diferentes de H e He) de alta intensidade no espectro das nebulosas ionizadas, denominadas de linhas de excitação colisional ou linhas proibidas.

1.1 Propriedades físicas em regiões H II

Em todas as nebulosas gasosas ocorrem os processos físicos de **fotoionização**, **recombinação**, **excitação colisional**, **desexcitação radioativa** e **colisões elásticas** entre os elétrons, variando apenas os níveis de intensidade destes processos (OSTERBROCK, 1989).

Fotoionização é o processo pelo qual um elemento absorve um fóton e, como con-

sequência, emite um elétron cuja energia cinética igual à diferença entre a energia do fóton incidente e o potencial de ionização do átomo. Entende-se por potencial de ionização a energia necessária para retirar um elétron do átomo.

O processo inverso à fotoionização é conhecido como recombinação, ou seja, consiste na captura de um elétron livre por um íon e a consequente liberação de um fóton com a energia igual à diferença entre a energia cinética do elétron livre e a energia do nível no qual o elétron foi capturado. O elétron pode ser capturado para qualquer nível de energia do átomo. Sendo este um nível excitado, o elétron irá realizar várias transições para estados de menor energia, emitindo fótons com energias específicas, até atingir o nível fundamental.

Excitação colisional ocorre quando elétrons livres colidem com átomos ou íons, e a energia transferida não é suficiente para retirar um elétron, mas apenas para mudá-lo de nível de energia, excitando o átomo. Após um intervalo de tempo, este elétron decai, emitindo fótons de energias específicas.

Desexcitação radioativa de elétrons excitados por colisão ocorre quando o átomo excitado está em um nível metaestável, isto é, o tempo de decaimento é muito elevado. Para densidades do meio iguais às encontradas em laboratório, este fenômeno não ocorre, por isso os fótons emitidos desta forma são conhecidos como emissão de linha proibida, por exemplo as linhas do [S II]. Nas baixas densidade das nebulosas este fenômeno é frequente e útil na determinação das propriedades físicas das nebulosas gasosas.

Por meio das colisões elásticas entre elétrons livres e partículas recém-liberadas pela fotoionização, dá-se a distribuição de energia cinética. Essas colisões são muito frequentes. Por isso, embora as nebulosas gasosas não estejam em equilíbrio termodinâmico, a distribuição de velocidade dos elétrons livres corresponde a uma distribuição maxwelliana de velocidade, com uma temperatura, chamada de temperatura eletrônica, em torno de 10 000 K para regiões H II típicas.

1.1.1 Densidade eletrônica

A razão de linhas de excitação colisional de um mesmo íon, cujas linhas são emitidas a partir de transições de níveis com energias de excitação muito próximas, possuem taxa de excitação relativa entre os níveis dependente apenas da razão de seus pesos estatísticos. Tendo os níveis diferentes probabilidades de transição radiativa ou taxa de desexcitação colisional, a população relativa destes, assim como a razão de suas linhas, possuirão grande dependência em relação à densidade eletrônica. Para a região do ótico, tem-se que a razão das linhas $\lambda 6716$ e $\lambda 6731$ do Exofre uma vez ionizado é um bom sensor

de densidade eletrônica. A figura 1 apresenta o diagrama de energia para o [S II].

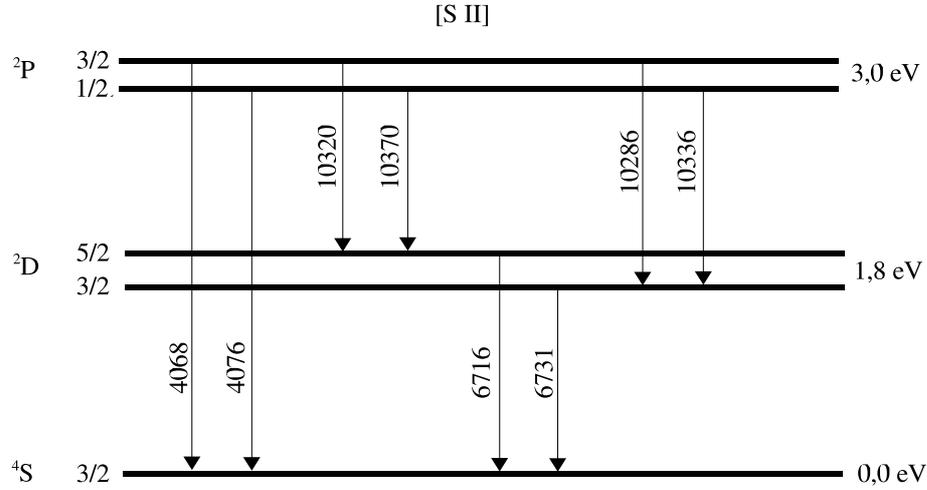


Figura 1 – Diagrama dos níveis de energia para a configuração p^3 de [S II]. Os comprimentos de onda das transições estão representados em angstroms (Å).

Conforme observado no diagrama de energia, as linhas $\lambda 6716$ e $\lambda 6731$ se encontram na região de interesse do ótico, apresentando todas as propriedades de interesse para a estimativa de densidade eletrônica. Então, com a razão [S II] obtém-se a densidade utilizando-se, por exemplo, a equação 1.1 indicada por Copetti & Writzl (2002) para a aproximação do átomo de 5 níveis

$$\frac{I(\lambda 6716)}{I(\lambda 6731)} = 1,44 \left(\frac{1 + 3,98 \times 10^{-2} N_e / T_e^{1/2}}{1 + 12,83 \times 10^{-2} N_e / T_e^{1/2}} \right), \quad (1.1)$$

sendo:

$I(\lambda 6716)/I(\lambda 6731)$ = razão das intensidades das linhas de [S II];

N_e = densidade eletrônica, em cm^{-3} ;

T_e = temperatura eletrônica, em K.

A estimativa da densidade eletrônica possui uma fraca dependência em relação à temperatura eletrônica, da ordem de $1/T_e^{1/2}$, conforme pode ser observado na equação 1.1. A figura 2 reproduz a relação entre a razão de linha do [S II] e a densidade eletrônica estimada pelo modelo. Nota-se que existe um intervalo definido e limitado de valores de razão de linhas para os quais o modelo converge, se a razão for maior do que 1,43, por exemplo, tem-se que o modelo não possui solução, e que a densidade eletrônica tende a zero.

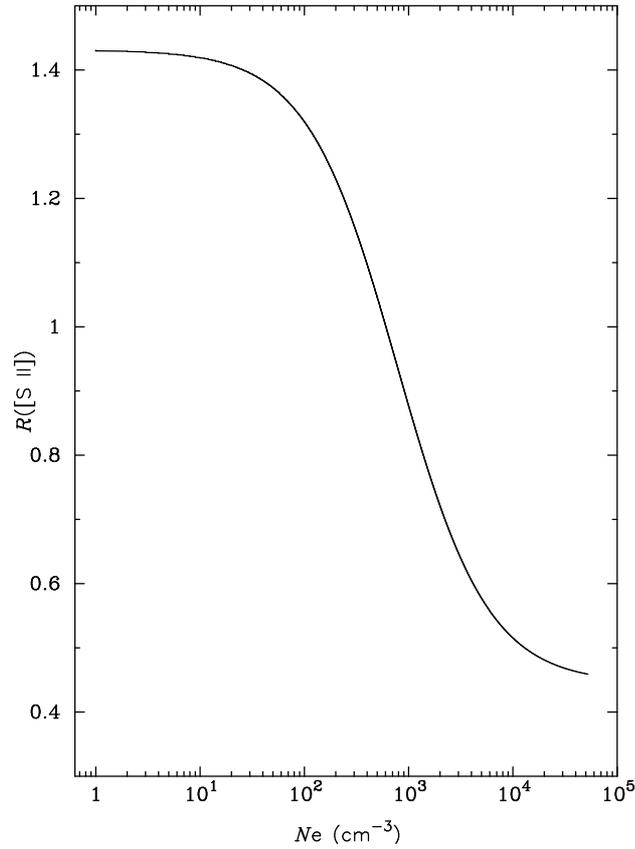


Figura 2 – Intervalo de convergência do modelo de átomos de 5 níveis para a densidade eletrônica. O eixo horizontal está em escala logarítmica.

1.1.2 Temperatura eletrônica

A temperatura eletrônica pode ser estimada com a utilização de razão de linhas de emissão de um mesmo íon, com energias de excitação diferentes, e observáveis na mesma faixa espectral. Desse modo, as taxas de excitação ou desexcitação têm uma forte dependência com a temperatura. Observa-se do diagrama de energia para o íon [O III] (Figura 3) que as linhas $\lambda 4959$ e $\lambda 5007$ têm a mesma energia e a linha $\lambda 4363$ tem uma energia diferente, sendo essa diferença proporcional à temperatura, sugerindo que a razão [O III] seja um bom sensor de temperatura eletrônica.

Como pode ser observado no diagrama dos níveis de energia, um elétron no nível ^1S irá decair liberando um fóton de energia equivalente ao comprimento de onda de $\lambda 2321$ indo direto para o nível de menor energia, ou irá decair para o nível ^1D , emitindo um fóton em $\lambda 4363$, e posteriormente decairá emitindo fótons em $\lambda 4959$ ou $\lambda 5007$, em uma proporção próxima a 1 para 3, respectivamente. A razão das intensidades das linhas do decaimento escalonado é proporcional à temperatura eletrônica da nebulosa, permitindo sua estimativa (OSTERBROCK, 1989)

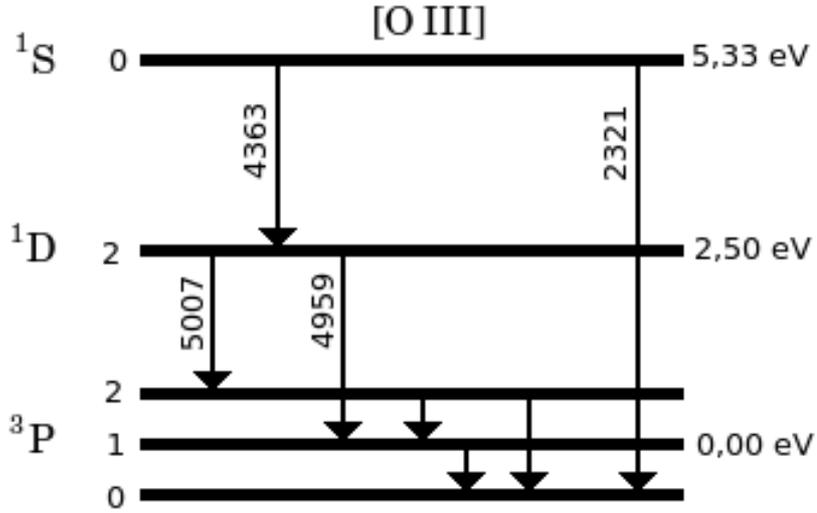


Figura 3 – Diagrama dos níveis de energia para a configuração p^2 de $[O III]$. Os comprimentos de onda das transições estão representados em angstroms (Å).

$$\frac{I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)}{I(\lambda 4363)} = \frac{7,73 \exp[(3,29 \times 10^4)/T_e]}{1 + 4,5 \times 10^{-4}(N_e/T_e^{1/2})} \quad (1.2)$$

sendo:

$(I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007))/I(\lambda 4363)$ = razão das intensidades das linhas de $[O III]$;

N_e = densidade eletrônica, em cm^{-3} ;

T_e = temperatura eletrônica, em K.

Embora a equação 1.2 possa ser utilizada para uma estimativa numérica da temperatura eletrônica, ela não é exata, pois o íon O^{++} apresenta uma seção de choque dependente com a temperatura (OSETERBROCK, 1989). Utilizando o limite de baixa densidade ($N_e < 10^4 \text{ cm}^{-3}$), pode-se aproximar, ainda mais, a equação 1.2, levando o denominador no lado direito a 1, resultando em

$$\frac{I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)}{I(\lambda 4363)} = 7,73 \exp[(3,29 \times 10^4)/T_e], \quad (1.3)$$

sendo:

$(I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007))/I(\lambda 4363)$ = razão das intensidades das linhas de $[O III]$;

N_e = densidade eletrônica, em cm^{-3} ;

T_e = temperatura eletrônica, em K.

A figura 4 apresenta uma relação entre a razão de linhas do [O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$ e a temperatura eletrônica estimada para o limite de baixa densidade. Na construção da figura adotou-se uma densidade eletrônica arbitrária igual a 100 cm^{-3} .

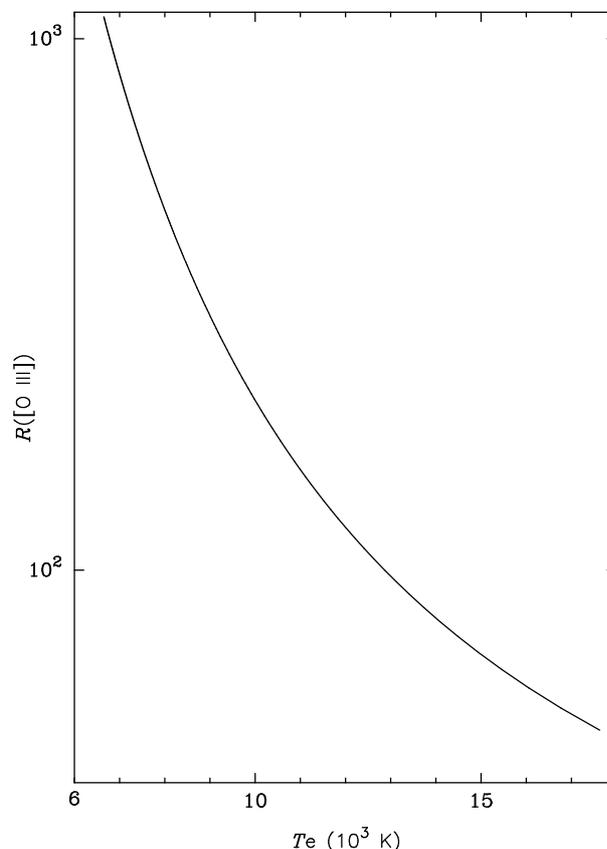


Figura 4 – Intensidade da razão de linhas do [O III] em função da temperatura eletrônica, no limite de baixa densidade. O eixo vertical está em escala logarítmica.

O limite de baixa densidade é uma boa aproximação, visto que a nebulosa é opticamente fina à radiação de linhas proibidas e assumi-se que seja isotérmica, então a estimativa da temperatura eletrônica pode ser realizada pela equação 1.3. Por outro lado, se a desexcitação colisional não for completamente negligenciável, então uma estimativa aproximada da densidade eletrônica aplicada na equação 1.2 fornece uma melhor aproximação para T_e .

1.2 Flutuações de temperatura eletrônica

As abundâncias químicas em regiões H II e nebulosas planetárias estimadas via linhas de emissão por excitação colisional são fortemente dependentes da temperatura eletrônica, implicando na necessidade de uma determinação precisa desta propriedade

física. No entanto, Peimbert (1967) encontrou diferenças consideráveis entre a temperatura eletrônica estimada via diferentes métodos, verificando que as temperaturas calculadas via linhas proibidas foram sistematicamente superiores às calculadas via contínuo de Balmer. Então, o autor sugeriu que a ocorrência de uma flutuação espacial interna de temperatura (t^2) estaria ocasionando essas diferenças observadas e que esse parâmetro indica que a temperatura eletrônica não é constante na nebulosa, visto que nem todos os íons têm a mesma distribuição espacial. O parâmetro t^2 é uma variância relativa entre a temperatura eletrônica e a sua média, indicando uma dispersão estatística em relação a esta.

A temperatura eletrônica fornece o valor referente à zona onde o íon utilizado como sensor está presente, ou seja, a temperatura eletrônica calculada via razão de linhas do [O III] indica o valor de temperatura associado à região onde se encontra o íon O^{++} , que está próximo à fonte de ionização. Sendo assim, uma flutuação de temperatura é esperada, tendo em vista a utilização de diferentes sensores. O modelo mais complexo de cálculo de abundância química de nebulosas gasosas minimiza os efeitos de flutuação de temperatura dividindo a nebulosa em zonas de ionização, com as propriedades calculadas com os sensores mais representativos para cada zona de ionização. Porém, as diferenças encontradas por Peimbert (1967) não foram explicadas por esta teoria, dessa forma, o autor definiu o parâmetro t^2 como

$$t^2 = \frac{\int (T_e - T_0)^2 N_i N_e dV}{T_0^2 \int N_i N_e dV}, \quad (1.4)$$

e

$$T_0 = \frac{\int T_e N_i N_e dV}{\int N_i N_e dV}, \quad (1.5)$$

sendo:

N_e = densidade eletrônica;

N_i = densidade do íon utilizado como sensor de temperatura eletrônica;

V = volume de integração da nebulosa;

T_0 e t^2 = média e variância relativa da distribuição de temperatura ponderada pelo quadrado da densidade local.

Porém, dados observacionais não confirmam os valores esperados para t^2 , que são sempre superiores aos preditos por modelos de fotoionização, estes são da ordem de 10^{-3} (GRUENWALD & VIEGAS, 1995; KINGDON & FERLAND, 1995). Esteban (2002), partindo de uma análise do que já havia sido publicado sobre o assunto, sugeriu que t^2 possui várias origens e que diferentes tipos de fenômenos atuam ao mesmo tempo nas flutuações de temperatura, não existindo uma solução única para o problema. O mesmo

autor menciona que este parâmetro é efetivo para correções na estimativa de temperatura eletrônica em regiões H II, mas não em nebulosas planetárias, por estas apresentarem uma estrutura física mais complexa. Por outro lado, Liu (2002), utilizando o mesmo ponto de partida, mas com uma abordagem diferente, sugere que t^2 não explica completamente todas as discrepâncias encontradas nas medidas de temperatura eletrônica e, conseqüentemente, não é capaz de fornecer uma explicação correta para a estimativa de abundâncias químicas, sugerindo a existência de algo a mais, como bolhas de alta densidade eletrônica que subestima as intensidades medidas das linhas $\lambda\lambda 4959, 5007$ em relação à linha $\lambda 4363$ o que leva a valores artificialmente elevados de $T_e[\text{O III}]$. Possivelmente, existam vários fatores agindo em conjunto com a flutuação de temperatura capazes de resolver o problema das divergências entre os valores calculados para a temperatura segundo os diferentes métodos.

A medida direta do parâmetro t^2 não é possível. Porém pode-se quantizar os efeitos observados nas medidas de temperatura eletrônica, ou ainda, nos valores de abundâncias químicas de metais via diferentes métodos. Para este último, assumi-se que a existência e aplicação de t^2 nos cálculos implica que as estimativas de abundâncias químicas, segundo os diferentes métodos para se calcular temperatura eletrônica, resultam em valores iguais. Peimbert (1967) indicou uma relação entre o valor estimado de $T_e([\text{O III}])$ e o parâmetro t^2

$$T_e([\text{O III}]) = T_o \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{90800}{T_o} - 3 \right) t^2 \right] \quad (1.6)$$

sendo:

$T_e([\text{O III}])$ = temperatura eletrônica estimada via razão de linhas do [O III];

T_o = valor médio de temperatura eletrônica;

t^2 = flutuação de temperatura eletrônica.

Esteban *et al.* (1998, 1999a, 1999b) encontraram valores de $t^2 \approx 0,020-0,044$ para regiões H II Galácticas. Gruenwald & Viegas (1992) utilizaram modelos para regiões H II com diferentes tipos e quantidades de estrelas ionizantes, densidade de hidrogênio e/ou abundância de metais para reproduzir estimativas de abundância e de t^2 . Os resultados se mostraram dependentes das variáveis adotadas e da direção observada, estimando t^2 via os modelos variando de 0,007 até 0,016. Luridiana *et al.* (1999) estimaram valores entre 0,06 e 0,10 utilizando um modelo de fotoionização da região H II extragaláctica NGC 2363 e, para esta mesma nebulosa em duas seções distintas, Gonzalez-Delgado *et al.* (1994) calcularam t^2 igual a 0,064 e 0,098, respectivamente. Krabbe & Copetti (2005) encontraram em nebulosas planetárias Galácticas $t^2 = 0,0523$ para NGC 1535, $t^2 = 0,0085$

para NGC 2440, $t^2 = 0,0564$ para NGC 3242 e $t^2 = 0,050$ para NGC 7009.

Liu (1998) sugeriu uma aproximação discreta para se obter t^2 , representando a variância relativa ao quadrado da temperatura média dos valores medidos nas diversas aberturas, ponderadas pelo fluxo em H β , para tal utilizou-se

$$t_s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (T_e^i - T_0)^2 F_i(\text{H}\beta)}{T_0^2 \sum_{i=1}^N F_i(\text{H}\beta)}, \quad (1.7)$$

sendo:

T_e^i = temperatura eletrônica na abertura i ;

T_0 = valor médio de temperatura eletrônica;

$F_i(\text{H}\beta)$ = fluxo em H β obtido para a abertura i ;

N = quantidade total de aberturas utilizadas.

De fato, uma fração desta variância é devido exclusivamente aos erros nas medidas fornecendo na realidade um valor $t_s^2(\text{obs})$ que deve ser corrigido por $t_s^2 = t_s^2(\text{obs}) - t_{\text{er}}^2$, sendo t_{er}^2 o erro quadrático médio das medidas de temperatura eletrônica ponderado pelo fluxo em H β . Desta forma, é possível estimar o valor final de t_s^2 .

1.3 Objetivos do estudo

O objetivo geral desse trabalho é realizar uma análise das propriedades físicas de dezoito regiões H II nas Nuvens de Magalhães.

Os objetivos específicos para a região H II NGC 346 são:

- estimar a temperatura eletrônica com uso da razão de [O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$;
- analisar as flutuações internas de temperatura eletrônica;
- estimar a densidade eletrônica com uso da razão de [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$;
- construir os mapas de superfície de fluxo em H α e densidade eletrônica.

Os objetivos específicos para as demais nebulosas da amostra são:

- estimar a densidade eletrônica com uso da razão de [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$;
- construção de perfis de intensidade de fluxo em H α , razão de linhas do S II e densidade eletrônica;

- caracterizar e identificar estruturas internas de densidade, assim como gradientes de densidade eletrônica.

A motivação para realizar este estudo foi a possibilidade de estimar a densidade e temperatura eletrônica ponto-a-ponto sobre regiões H II nas Nuvens de Magalhães. Pois tais medidas são essenciais na determinação da estrutura das mesmas e da galáxia que as contem.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão sobre as propriedades físicas e as regiões H II estudadas neste trabalho. No capítulo 3 serão apresentados os procedimentos realizados para a coleta e redução dos dados, o método para a obtenção das medidas das linhas de emissão e das propriedades físicas das nebulosas observadas. No capítulo 4 encontram-se resultados desse estudo, sendo apresentados os valores estimados de densidade e temperatura eletrônica em NGC 346, assim como os mapas superficiais e a análise estatística das temperaturas eletrônicas. Também é apresentado neste capítulo, os valores estimados de densidade eletrônica, os perfis de densidade e a análise estatística das densidade eletrônica para as regiões H II da amostra. Por fim, no capítulo 5 são apontadas as conclusões obtidas neste trabalho e as perspectivas futuras.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 NGC 346

A região H II extragaláctica NGC 346 (Figura 82, Apêndice B), também conhecida por N66 ou DEM S 103, é a maior e mais brilhante nebulosa gasosa da PNM. A região de maior brilho em NGC 346 está centrada sobre um aglomerado aberto e compacto de estrelas jovens, com mais de vinte estrelas classificadas como sendo do tipo espectral O (NIEMELA *et al.*, 1986; MASSEY *et al.*, 1989; WALBORN & BLADES, 1986; WALBORN *et al.*, 2000). A tabela 1 apresenta as coordenadas no sistema equatorial¹, e galácticas para NGC 346.

Tabela 1 – Coordenadas no sistema equatorial e galácticas das regiões H II observadas

Objeto	Sistema Equatorial		Galácticas	
	α (2000)	δ (2000)	Longitude	Latitude
GNM				
30 Doradus	5 ^h 38 ^m 38 ^s	−59°05′43″	379,45°	−31,67°
N4 A	4 52 09	−66 55 25	277,95	−36,37
Complexo N11	4 57 17	−66 26 22	277,20	−36,01
N44 D	5 22 51	−68 04 27	278,45	−33,24
N160 A	5 39 46	−69 38 40	280,09	−31,51
PNM				
N13	0 ^h 45 ^m 25 ^s	−73°23′04″	303,53°	−43,74°
N63	0 58 17	−72 38 51	302,22	−44,47
N77 A	1 02 49	−71 53 19	301,68	−45,21
N81	1 09 13	−73 11 39	301,15	−43,87
N83 A,C	1 13 50	−73 18 03	300,71	−43,73
N88	1 25 13	−72 53 19	299,66	−43,77

Henize (1956) elaborou um catálogo de aglomerados estelares e nebulosas das Nuvens de Magalhães, considerando a intensidade na imagem em H α , a irregularidade de forma,

¹As coordenadas no sistema equatorial utilizadas no presente trabalho são referentes ao ano 2000.

a alongação e o tamanho da estrutura interna, sendo NGC 346 classificada como tendo intensidade em $H\alpha$ e irregularidade médias, alongação nula e nenhuma estrutura visível. Além disso, o autor identificou HD 5980, sob coordenadas $\alpha = 0^{\text{h}}59^{\text{m}}27^{\text{s}}$ e $\delta = -72^{\circ}09'54''$, como a estrela mais brilhante da extremidade Leste de NGC 346, assumindo-a como a principal fonte de excitação da nebulosa. Walborn (1977) também realizou a classificação espectral da estrela HD 5980, mencionando ser uma estrela superluminosa, do tipo OB, eclipsando uma companheira binária de espectro variável Wolf-Rayet, com período estimado de 25,56 dias. Este autor obteve a classificação espectral de outra estrela brilhante em NGC 346, a Sk 80, uma supergigante do tipo espectral O7 Iaf+. Em 1978, Walborn identificou e resolveu duas das estrelas mais brilhantes, em magnitude aparente azul, do aglomerado que ioniza NGC 346. A primeira delas, com coordenadas $\alpha = 0^{\text{h}}59^{\text{m}}03^{\text{s}}$ e $\delta = -72^{\circ}10'27''$, foi classificada como do tipo O4 III(nf), sendo a do tipo espectral mais jovem conhecido na PNM. A segunda, sob coordenadas $\alpha = 0^{\text{h}}59^{\text{m}}05^{\text{s}}$ e $\delta = -72^{\circ}10'36''$, foi classificada como do tipo O8-9 III_{nrw}, com deficiência em linhas de metais. Utilizando a estimativa de luminosidade em $H\beta$, a primeira estrela foi considerada a principal fonte de ionização de NGC 346.

Israel (1980) observou em rádio diversas regiões HII nas Nuvens de Magalhães, encontrando cerca de 16 estrelas do tipo espectral O5 em NGC 346, portanto, estrelas ionizantes. Além disso, verificou a existência de picos de emissão térmica, sugerindo a presença de um remanescente de supernova (RSN). Contudo, esse resultado não foi conclusivo, visto que a emissão em rádio deste tipo de objeto, quando localizado no interior de uma região HII, comumente se confunde com a da própria região.

Seward & Mitchell (1981) obtiveram medidas de fontes de raio-X na PNM utilizando o *Einstein Observatory*. Duas possíveis fontes de raios-X foram identificadas em NGC 346 e, mesmo sem a precisão necessária para uma correta localização destas fontes, acredita-se que a denominada IE0057.6-7228 esteja correlacionada com essa região HII. Mills *et al.* (1982) observaram em rádio, ótico e raios-X 18 candidatas a RSN na PNM. Segundo os autores, a fonte de raios-X IE0057.6-7228 teve posição semelhante a observada para a fonte de rádio 0057-724, evidenciando uma correlação entre esses objetos, e consequentemente, a existência de um RSN. Dessa forma, considerando que essa fonte de raios-X está correlacionada com NGC 346, e o fato do aglomerado ionizante desta região HII ser numeroso, existe a possibilidade real de que um ou mais RSN estejam associadas a NGC 346. Por outro lado, Mathewson *et al.* (1983) não encontraram evidências óticas da existência de um RSN em NGC 346, embora imagens em rádio e raios-X a confirmem.

Nazé *et al.* (2004) utilizaram o telescópio espacial *XMM-Newton* para obter dados em raios-X de NGC 346, nos quais foram observadas e identificadas algumas binárias em raios-X de períodos variados, o sistema peculiar de HD 5980, além do remanescente de supernova

SNR 0057-7226, sob coordenadas $\alpha = 0^{\text{h}}59^{\text{m}}27^{\text{s}}$ e $\delta = -72^{\circ}10'15''$, que apresentou grande luminosidade em raios-X, caracterizando ser uma estrela de nêutrons.

Quanto às propriedades físicas de NGC 346, Aller & Faulkner (1962) realizaram estudo espectroscópico para estimar a temperatura eletrônica T_e utilizando a razão de linhas de excitação colisional do [O III], estimaram $T_e = 15\,000$ K, com as intensidades corrigidas por avermelhamento. Dufour (1975) adotando a densidade $N_e = 500\text{ cm}^{-3}$ obteve em NGC 346 $T_e(\text{[O III]}) = 13\,000 \pm 500$ K. Peimbert & Torres-Peimbert (1976), utilizando uma fenda de $5,2'' \times 77,6''$ orientada na direção Leste-Oeste, definiram a posição I para a região $40''$ ao Sul e $80''$ a Oeste da estrela S28 de Henize (1956), a posição II $4''$ ao Sul e $80''$ a Oeste da mesma estrela, e adotando $N_e = 400\text{ cm}^{-3}$ estimaram $T_e(\text{[O III]}) = 13\,650 \pm 500$ K, em ambas as posições. Dufour & Harlow (1977) utilizaram uma fenda de $9,95'' \times 78,7''$ orientada na direção Leste-Oeste, definiram a posição NW $90''$ ao Norte e $50''$ a Oeste da estrela S28, e assumindo $N_e = 100\text{ cm}^{-3}$ obtiveram $T_e(\text{[O III]}) = 12\,050 \pm 500$ K. Os mesmos autores também definiram a posição SE $20''$ ao Sul e $5''$ a Leste da estrela S28 encontrando $T_e(\text{[O III]}) = 11\,800 \pm 500$ K para NGC 346. Peimbert *et al.* (2000) realizaram espectroscopia de fenda longa, com tamanho angular de $4,7'$ na direção Leste-Oeste sobre o céu, em 13 posições sobre a região mais brilhante da nebulosa, variando de $5''$ a $26''$. Após, os autores integraram os resultados para a obtenção de duas seções maiores, denominadas região A e B. Para a região A obtiveram $N_e(\text{[S II]}) = 50 \pm 15\text{ cm}^{-3}$ e $T_e(\text{[O III]}) = 13\,070 \pm 80$ K, e para a região B valores de $N_e(\text{[S II]}) = 85 \pm 20\text{ cm}^{-3}$ e $T_e(\text{[O III]}) = 12\,755 \pm 90$ K. Tsamis *et al.* (2003) realizaram espectroscopia de fenda longa de regiões H II Galácticas e das Nuvens de Magalhães, estimando para NGC 346 valores de $N_e(\text{[S II]}) = 60\text{ cm}^{-3}$ e $T_e(\text{[O III]}) = 12\,400$ K, ambos com espectro integrado. Oliveira *et al.* (2008) realizou medidas ponto-a-ponto em três posições sobre NGC 346, encontrando uma temperatura eletrônica média, ponderada pelo fluxo em $\text{H}\beta$ de $12\,269 \pm 751$ K, sendo o erro dado pelo desvio padrão ponderado.

Kennicutt (1984) utilizando mapas de contínuo em rádio e de linhas de emissão de Balmer obteve algumas propriedades físicas de regiões H II gigantes. NGC 346 foi classificada como uma região H II gigante difusa, com alto brilho superficial, diâmetro de 220 pc , luminosidade em $\text{H}\alpha$ de $\log N[\text{s}^{-1}] = 38,77$, densidade eletrônica média RMS ($\langle N_e \rangle_{\text{RMS}}$) 4 cm^{-3} , com pico de $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}} = 30\text{ cm}^{-3}$, e um fator de preenchimento (*filling factor*) $\Phi = 0,02$. Copetti & Dottori (1989) obtiveram imagens fotométricas de 30 regiões H II na PNM e, para NGC 346 mediram a largura equivalente $W_{\text{H}\beta} = 185 \pm 30\text{ \AA}$, a razão entre os fluxos de $\text{[O III]}/\text{H}\beta = 5,57 \pm 0,11$ e o fluxo da linha de emissão $\text{H}\beta$ de $\log F(\text{H}\beta)[\text{erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}] = -9,73 \pm 0,02$. Copetti (1990), adotando um diâmetro médio de 228 pc para NGC 346, estimou o fluxo de fótons do contínuo de Lyman $\log Q[\text{s}^{-1}] = 50,8$, a densidade eletrônica média RMS de $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}} = 4\text{ cm}^{-3}$, a densidade eletrônica

$N_e < 100 \text{ cm}^{-3}$, o fator de preenchimento $\Phi > 0,01$ e a massa total de H ionizado de aproximadamente $53\,000 M_\odot$.

2.2 30 Doradus

30 Doradus (Figura 83, Apêndice B), também conhecida por Nebulosa da Tarântula, NGC 2070, N157 A ou DEM L 263, é a maior e mais brilhante nebulosa gasosa das Nuvens de Magalhães, se situando na borda norte GNM, suas coordenadas estão presentes na tabela 1.

Peimbert & Torres-Peimbert (1974), observaram em quatro diferentes seções sobre a nebulosa 30 Doradus utilizando uma fenda no sentido Leste-Oeste de $5,2' \times 77,6''$ no plano do céu. No entanto, em apenas duas destas regiões (I e II) houve resolução suficiente para estimar a sua densidade eletrônica. A seção I foi centrada na mesma ascensão reta e a $50''$ de declinação ao Norte da estrela HD 38268 ($\alpha = 5^{\text{h}}38^{\text{m}}42^{\text{s}}$ e $\delta = -69^{\circ}06'03''$), e a seção II foi centrada a $50''$ a Leste e $65''$ ao Norte dessa mesma estrela. Os autores estimaram a densidade de $1\,961 \text{ cm}^{-3}$ para a região I, e 911 cm^{-3} para a região II. Vermeij *et al.* (2002 a,b) também observaram em quatro seções de 30 Doradus, porém aquelas que se encontram afastadas do núcleo brilhante da nebulosa. A fenda utilizada foi alinhada no sentido Leste-Oeste, apresentando o tamanho angular de $4,1' \times 1,7''$ no plano do céu. Seguindo a nomenclatura dos autores, a região 1 foi centrada em $\alpha = 5^{\text{h}}38^{\text{m}}33^{\text{s}}$ e $\delta = -69^{\circ}06'27''$, a região 2 está deslocada $45''$ para o Sul, a região 3 se encontra deslocada $15''$ a Leste e $1,25'$ para o Sul, e a região 4 está deslocada $20''$ a Leste e $1,1'$ para o Sul, em todos os casos o referencial é a região 1. Os valores calculados de densidade eletrônica foram 500 , 470 , 570 e 400 cm^{-3} , para as regiões 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Tsamis *et al.* (2003) utilizaram uma fenda longa no sentido Leste-Oeste de $5,6' \times 1,5''$ no plano do céu, centrada sobre a seção mais brilhante de 30 Doradus. O valor integrado de densidade eletrônica estimado foi de 390 cm^{-3} .

2.3 GNM: N4 A

A região H II N4, pertencente a GNM, é composta por duas regiões bem definidas de alto brilho superficial em $\text{H}\alpha$. A componente de interesse para este trabalho (N4 A) também é conhecida por NGC 1714 ou DEM L 8 B, cujas coordenadas estão indicadas na tabela 1.

Peimbert & Torres-Peimbert (1974), utilizando uma fenda no sentido Leste-Oeste de $5,2' \times 77,6''$ no plano do céu, observaram a seção mais brilhante da nebulosa, esti-

mando uma densidade eletrônica integrada de 182 cm^{-3} . Heydari-Malayeri & Lecavelier des Etangs (1994) realizaram um estudo detalhado da morfologia de N4 A, encontrando evidências da existência de uma estrutura compacta e brilhante embebida na nebulosidade, caracterizando um possível efeito champagne. Segundo os autores, a estimativa de densidade eletrônica na região central foi de 130 cm^{-3} , e na borda externa a Nordeste da central, foi de 640 cm^{-3} , demonstrando a existência de um forte gradiente de densidade eletrônica. Vermeij *et al.* (2002 a,b) observaram duas seções sobre a nebulosa GNM: N4 A utilizando uma fenda alinhada com o PA² de $-53,3^\circ$ e comprimento angular de $4,1' \times 1,7''$ no plano do céu. A região A1 foi centrada em $\alpha = 5^{\text{h}}39^{\text{m}}43^{\text{s}}$ e $\delta = -69^\circ38'51''$, e a região A2 foi centrada em $\alpha = 5^{\text{h}}39^{\text{m}}46^{\text{s}}$ e $\delta = -69^\circ38'37''$. Para o cálculo da densidade eletrônica os autores integraram as duas regiões observadas resultando em uma densidade média de $N_e = 220 \text{ cm}^{-3}$.

2.4 GNM: Complexo N11

Este é um objeto gigante (Figura 84, Apêndice B), pertencente a GNM, composto por doze nebulosas com diferentes brilhos superficiais em $\text{H}\alpha$. As componentes do complexo N11 são denominados por letras de A até L, sendo as regiões mais brilhantes identificadas como N11 B e N11 C, e as mais fracas como N11 F e N11 I. As componentes mais brilhantes também são conhecidas por outras nomenclaturas, como por exemplo N11 B pode ser identificado por NGC 1763; N11 C por NGC 1769; e N11 E por NGC 1773 ou DEM L 41. As coordenadas referente ao centro do complexo estão indicadas na tabela 1.

Dufour (1975) estimou a densidade eletrônica integrada de N11 B via razão de linhas do [S II], utilizando uma fenda de $13'' \times 79,6''$ no plano do céu, alinhada no sentido Leste-Oeste e centrada em $\alpha = 4^{\text{h}}56^{\text{m}}54^{\text{s}}$ e $\delta = -66^\circ23'27''$. O valor de densidade eletrônica encontrado pelo autor foi baixo, menor que 100 cm^{-3} . Pagel *et al.* (1978) estimaram a densidade eletrônica sobre a região central e mais brilhante desta nebulosa, em uma posição próxima a adotada por Dufour (1975), e utilizando uma fenda de $42'' \times 1''$, no plano do céu, obtiveram uma densidade eletrônica integrada de 191 cm^{-3} . Tsamis *et al.* (2003) utilizando uma fenda longa com PA = -57° , de tamanho angular de $5,6' \times 1,5''$ no plano do céu e centrada na seção mais brilhante central, estimaram um valor de $N_e = 80 \text{ cm}^{-3}$.

Heydari-Malayeri *et al.* (1987) utilizando uma fenda de $8'' \times 4''$ mediram a razão de linha do [S II] em 143 pontos sobre a N11 C, verificando a presença de um pico de densidade

²Indica o ângulo da fenda em relação ao sistema de coordenadas, adota-se PA=90° para a fenda na direção Leste-Oeste.

eletrônica de 350 cm^{-3} e 50% dos valores calculados de densidade menores que 50 cm^{-3} . Para N11 E, os mesmos autores utilizando uma fenda de $4'' \times 4''$, realizaram medidas em 84 pontos sobre essa nebulosa, obtendo o valor de pico de 230 cm^{-3} . Além disso, foi verificado que 70% das estimativas de densidade eletrônica são menores que 50 cm^{-3} .

2.5 GNM: N44 D

Esta é uma pequena e brilhante região H II pertencente ao complexo N44 (Figura 85, Apêndice B) na GNM, sendo o objeto de maior brilho superficial em $H\alpha$ da seção Sul do complexo. N44 D também é conhecida por IC 2128, suas coordenadas são apresentadas na tabela 1.

Poucos estudos foram realizados sobre este objeto até momento, não existindo relato de estudos que abordem a determinação de suas propriedades físicas. Já para outros membros do complexo, como por exemplo N44 B, encontram-se uma vasta literatura, contendo estimativas de suas propriedades físicas.

2.6 GNM: N160 A

Componente mais brilhante do complexo de regiões H II gigantes N160, pertencente a GNM, ao Sul e próximo de 30 Doradus (Figura 86, Apêndice B). N160 A também é conhecida por NGC 2080 ou DEM L 284, cujas coordenadas estão indicadas na tabela 1.

Dufour (1975) estimou a densidade eletrônica utilizando uma fenda na direção Leste-Oeste, centrada em $\alpha = 5^{\text{h}}40^{\text{m}}12^{\text{s}}$ e $\delta = -69^{\circ}40'00''$, com tamanho angular de $13'' \times 79,6''$ sobre o plano do céu. O valor calculado foi menor que 100 cm^{-3} . Heyadari-Malayeri & Testor (1986) observaram três seções sobre N160 A, com fenda de tamanho angular de $4'' \times 8''$ no plano do céu e alinhada na direção Leste-Oeste, sendo cada seção observada centrada sobre um bulbo de forte emissão em $H\alpha$. A1 foi centrada sobre a seção mais brilhante, $\alpha = 5^{\text{h}}39^{\text{m}}43^{\text{s}}$ e $\delta = -69^{\circ}38'54''$; A2 sobre a seção de brilho intermediário, $\alpha = 5^{\text{h}}39^{\text{m}}45^{\text{s}}$ e $\delta = -69^{\circ}38'39''$; e A3 sobre a seção de brilho menos intenso, $\alpha = 5^{\text{h}}39^{\text{m}}44^{\text{s}}$ e $\delta = -69^{\circ}38'40''$. Os valores estimados de densidade eletrônica integrada foram de 2000, 540 e 270 cm^{-3} , para as seções A1, A2 e A3, respectivamente. Vermeij *et al.* (2002 a,b) utilizaram uma fenda de $1,7'' \times 4,1'$, alinhada na direção Leste-Oeste e centrada em duas seções da nebulosa GNM: N160 A (A1 e A2, citada anteriormente). Estimando uma densidade integrada de 610 cm^{-3} na região A1, e 660 cm^{-3} na região A2.

2.7 PNM: N13

A região H II PNM: N13, pertencente a PNM, apresenta uma acentuada forma elíptica de pequena dimensão, com alto brilho em $H\alpha$. Em alguns catálogos PNM: N13 se encontra dividida em componentes A e B, que corresponde a duas seções aproximadamente circulares de alto brilho observadas em imagens fotométricas. Este objeto também é conhecido por DEM S 16 com coordenadas indicadas na tabela 1.

Pagel *et al.*(1978), utilizando uma fenda de $42'' \times 1''$ centrada no objeto, na direção Leste-Oeste, estimou uma densidade eletrônica integrada para N13 de 547 cm^{-3} . Copetti (1989) estimou a densidade eletrônica média $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}}$ de 19 cm^{-3} , um fator de preenchimento Φ de 0,003 e uma massa total de H ionizado de aproximadamente $270 M_{\odot}$.

2.8 PNM: N63 e PNM: N77

PNM: N63 e PNM: N77 são regiões H II pertencentes a PNM, ambas apresentam uma forma aproximadamente circular de pequenas dimensões, com um raio da ordem de $30''$ no plano do céu. Sendo que, PNM: N63 também é conhecida por DEM S 94 e PNM: N77 por DEM S 117 B. As coordenadas de ambas os objetos estão presentes na tabela 1.

Copetti (1989) estimou para PNM: N63 uma densidade eletrônica média $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}}$ como sendo igual a 42 cm^{-3} e uma massa total de H ionizado de cerca de $65 M_{\odot}$. Para PNM: N77, o autor calculou uma densidade média $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}}$ de 54 cm^{-3} e a massa total de H ionizado de aproximadamente $35 M_{\odot}$.

2.9 PNM: N81

N81 é uma região H II esférica de pequenas dimensões angulares e muito brilhante (Figura 87, Apêndice B), pertencente a PNM. É também conhecida por IC 1644 ou DEM S 138 cujas coordenadas se encontram na tabela 1.

Dufour & Killen (1977) obtiveram um espectro integrado sobre N81, estimando densidade eletrônica via razão de linhas do $[S II]$ de 1533 cm^{-3} . Dufour *et al.* (1982) utilizando uma fenda de abertura elíptica de $10'' \times 20''$, centrada na secção mais brilhante da nebulosa, calcularam uma densidade integrada de 1000 cm^{-3} . Heydari-Malayeri *et al.* (1988) realizaram um estudo detalhado de N81, observando diversas seções quadradas de $2''$ e $4''$ de lado, e curtos tempos de exposição. Os autores estimaram, dentre outras propriedades físicas, uma densidade eletrônica integrada de 420 cm^{-3} . Wilcots (1994) utilizou

uma fenda longa de $6,2' \times 10''$, orientada na direção Leste-Oeste em duas posições, uma sobre o núcleo mais brilhante do objeto e outra sobre a borda Norte. O espectro da região do núcleo foi o único com resolução suficiente para estimar a densidade eletrônica integrada de PNM: N81, estimando os valores de $N_e = 330 \text{ cm}^{-3}$ e uma densidade média $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}} = 170 \text{ cm}^{-3}$. Vermeij *et al.* (2002 a,b) utilizando uma fenda longa alinhada na direção Leste-Oeste, com tamanho angular de $4,1' \times 5''$ e centrada sobre o objeto, estimaram uma densidade integral de $N_e = 400 \text{ cm}^{-3}$ para PNM: N81.

2.10 PNM: N83 A,C

N83 é um complexo de regiões H II pertencentes a PNM, que apresenta um tamanho angular de porte médio. Os alvos deste trabalho são as componentes A e C do complexo, notadamente identificados como as seções mais brilhante do objeto, sendo também conhecidos por NGC 456 ou DEM S 147, suas coordenadas estão apresentadas na tabela 1.

Pagel *et al.* (1978) utilizaram uma fenda de $42'' \times 1''$ no plano do céu, centrada em N83 A e alinhada na direção Leste-Oeste, porém não obtiveram resolução suficiente para resolver as linhas do [S II]. Contudo, os autores estimaram um limite superior para densidade eletrônica integrada de 219 cm^{-3} . Copetti (1989) estimou a densidade eletrônica média $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}}$ igual a 10 cm^{-3} , um fator de preenchimento Φ maior que 0,003, uma massa total de H ionizado de aproximadamente $2900 M_{\odot}$ e uma densidade eletrônica menor que 200 cm^{-3} .

2.11 PNM: N88

N88 é uma região H II de dimensões reduzidas (raio na ordem de $20''$) e de baixo brilho superficial em $H\alpha$, pertencente a PNM. É também conhecida por DEM S 161, cujas coordenadas estão presentes na tabela 1.

Copetti (1989) estimou a densidade eletrônica média $\langle N_e \rangle_{\text{RMS}}$ igual a 12 cm^{-3} e a massa total de H ionizado de aproximadamente $760 M_{\odot}$. Wilcots (1994) utilizou uma fenda longa de $6,2' \times 10''$, orientada na direção Leste-Oeste sobre o núcleo mais brilhante do objeto. As medidas foram integradas em dois tamanhos angulares diferentes, o primeiro denominado de f resultou da integração sobre todo o núcleo da nebulosa (cerca de $90''$), para o qual o autor estimou uma $N_e = 300 \text{ cm}^{-3}$. Para o segundo, denominado de O e apresentando um angular de $30''$, o autor estimou uma $N_e = 410 \text{ cm}^{-3}$. Vermeij *et al.* (2002 a,b) utilizando uma fenda longa alinhada na direção Leste-Oeste, de tamanho

angular de $4,1' \times 5''$ e centrada sobre o objeto, estimaram uma densidade integral de $N_e = 1\,620 \text{ cm}^{-3}$ para PNM: N88.

No próximo capítulo apresenta-se os procedimentos utilizados na observação dos dados e na redução dos mesmos, assim como os passos e métodos utilizados na medida das linhas e nas estimativas das propriedades físicas.

3 *Observação, Redução e Medidas das Linhas de Emissão*

Dados espectroscópicos utilizando fenda longa foram obtidos para dezoito regiões H II das Nuvens de Magalhães. A coleta de dados foi realizada em diversos projetos observacionais do Prof. Marcus V. F. Copetti desde 1992 até 2008. O sítio de observação foi o Observatório Pico dos Dias (OPD), Brazópolis - MG, mantido e administrado pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), sediado em Itajubá - MG utilizando o telescópio de 1,60 m; exceto a observação realizada em 1º de agosto de 2008 na qual se utilizou o telescópio de 0,60 m do mesmo observatório. As observações de 7 a 9 de novembro de 2004; de 17 a 23 de outubro de 2006; de 12 a 14 de abril de 2007; 1º de fevereiro e 3 de novembro de 2008 foram realizadas pelo acadêmico Vinicius de A. Oliveira

3.1 Coleta dos dados

Para a coleta dos dados foi utilizado um espectrógrafo Cassegrain acoplado ao telescópio de 1,60 m de diâmetro do OPD e, no caso específico da observação de 1º de agosto de 2008, o espectrógrafo Cassegrain acoplado ao telescópio de 0,60 m de diâmetro do OPD.

Para NGC 346 a fenda foi posicionada na direção Leste-Oeste tendo um tamanho de $5,63'$ no plano do céu, e uma abertura de $1,5''$. O detector utilizado foi um CCD SITE de 2048×2048 píxeis com escala espacial de $0,56'' \text{ pxl}^{-1}$. Em todas as observações foram utilizadas uma rede de dispersão de 1200 linhas mm^{-1} e nas observações em novembro de 2002, também foi utilizado uma rede de dispersão de 1200/500 linhas mm^{-1} , em todos os casos a dispersão espectral foi de $0,5 \text{ \AA} \text{ pxl}^{-1}$. Os dados obtidos em novembro de 2002 cobriram a faixa espectral azul do ótico (4000 a 5000 \AA) e a faixa espectral vermelho do ótico (6000 a 7000 \AA), todos os demais espectros obtidos cobriram a faixa espectral do vermelho no ótico. Foram extraídos espectros ao longo da direção Norte-Sul. A separação entre cada posição foi de $5''$, resultando em 17 posições, que cobrem uma região de $40''$ S a $40''$ N sobre a nebulosa (Figura 5). A posição $0''$ representa a fenda centrada sobre a estrela MPG 470

(MASSEY *et al.*, 1989), utilizada como referência, com coordenadas $\alpha = 0^{\text{h}}59^{\text{m}}06^{\text{s}}$ e $\delta = -72^{\circ}10'34''$ e tipo espectral O8-9 III_{inw} (WALBORN, 1978). As posições positivas indicam um deslocamento da fenda para o Norte da estrela de referência, e as negativas para o Sul, ambos em segundos de arco no plano do céu. Durante a observação, a posição de fenda em $+30''$ foi deslocada para Leste, aproximadamente $70''$, no intuito de obter um espectro da região de maior brilho em $\text{H}\alpha$ de NGC 346.

Nas demais regiões H II observadas o alinhamento da fenda foi variável conforme a nebulosa observada (Figuras 6–22), com tamanho angular de $3,2'$ no plano do céu nos anos de 1992 a 1995, no ano de 2004 de $4,5'$, nos anos de 2006 até 2008 de $5,0'$, e em agosto de 2008 de $3,6'$. Para as observações ocorridas de 1992 a 1995 utilizou-se o detector CCD EEV UV-coated de 770×1152 píxeis, com uma fenda de $1200/750$ linhas mm^{-1} , resultando em uma dispersão espectral foi de $0,75 \text{ \AA pxl}^{-1}$. O detector utilizado nos anos de 2004 a 2008 foi um CCD SITE de 2048×2048 píxeis com escala espacial de $0,56'' \text{ pxl}^{-1}$, com uma rede de dispersão de $1200/750$ linhas mm^{-1} , resultando em uma dispersão espectral foi de $0,5 \text{ \AA pxl}^{-1}$. Para todos os turnos as observações foram na faixa espectral vermelho no ótico (6000 a 7000 \AA).

Exposições de *flat-fields* e de *bias* foram realizadas no início e no final de cada noite de observação. Para os dados de 1992 a 1995 não foi realizada a calibração em fluxo e nem a observação de estrelas padrão, pois o objetivo era apenas estimativa de densidade eletrônica cuja determinação, via linhas do [S II], não necessitam de calibração em fluxo. Por outro lado, para os dados coletados entre 2002 e 2008 quando foram extraídos espectros de estrelas padrão, tais como HR 1544, HR 3454, HR 7596, HR 8634 e HR 9087, foi possível realizar a calibração em fluxo. Já para a calibração em comprimento de onda, realizou-se exposições curtas de lâmpadas de He-Ar para a faixa do azul, e de lâmpadas de Ne-Ar para a faixa do vermelho, antes e depois de cada exposição do objeto e da estrela padrão.

Os registros observacionais referentes aos turnos de observação para NGC 346 estão indicados na tabela 2, na qual as posições utilizadas na fenda estão indicados na primeira coluna, com a posição $0''$ indicando a que a fenda está sobre a estrela de referência. Por sua vez, a tabela 3 apresenta os registros observacionais obtidos nos turnos de observação realizados para as demais regiões H II estudadas. Optou-se pela divisão conforme a galáxia em que pertencem e a primeira coluna indica o nome utilizado neste trabalho para as regiões H II observadas.

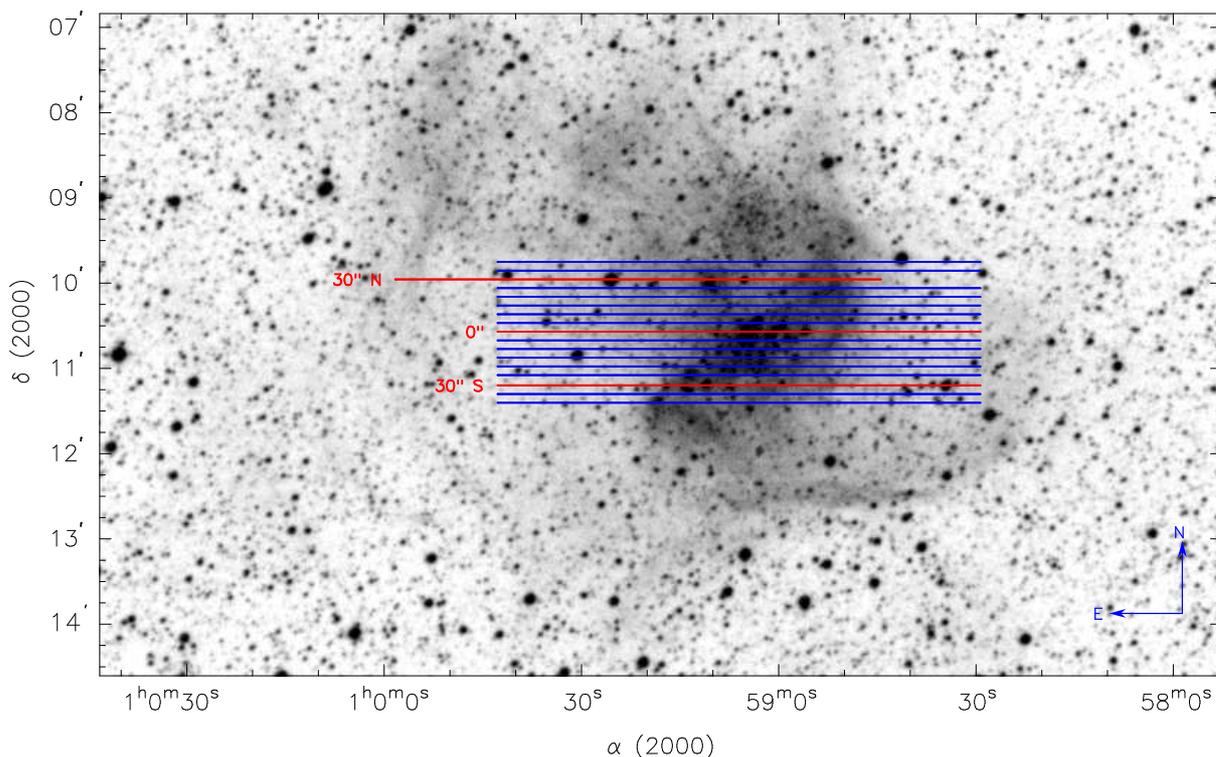


Figura 5 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II NGC 346 com espaçamento entre cada posição de $5''$. As linhas em vermelho apresentam as posições observadas em duas regiões do espectro, sendo possível estimar tanto a densidade eletrônica quanto a temperatura eletrônica, as demais foram observadas apenas uma região, a referente ao cálculo da densidade eletrônica. Imagem na banda R , número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 15/02/2008.

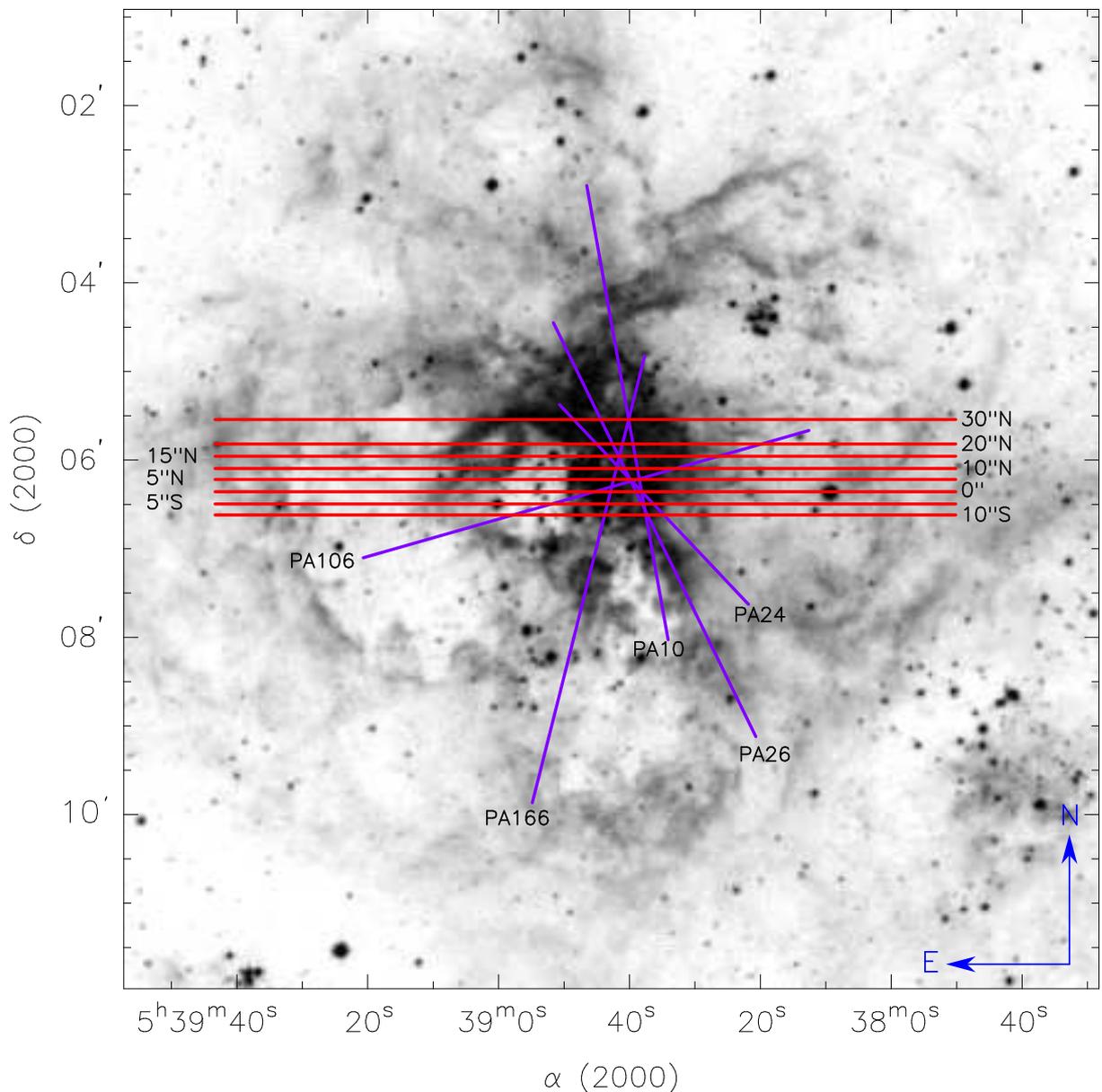


Figura 6 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: 30 Doradus. Imagem na banda *SR*, número 056, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Science and Engineering Research Council* (SERC). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

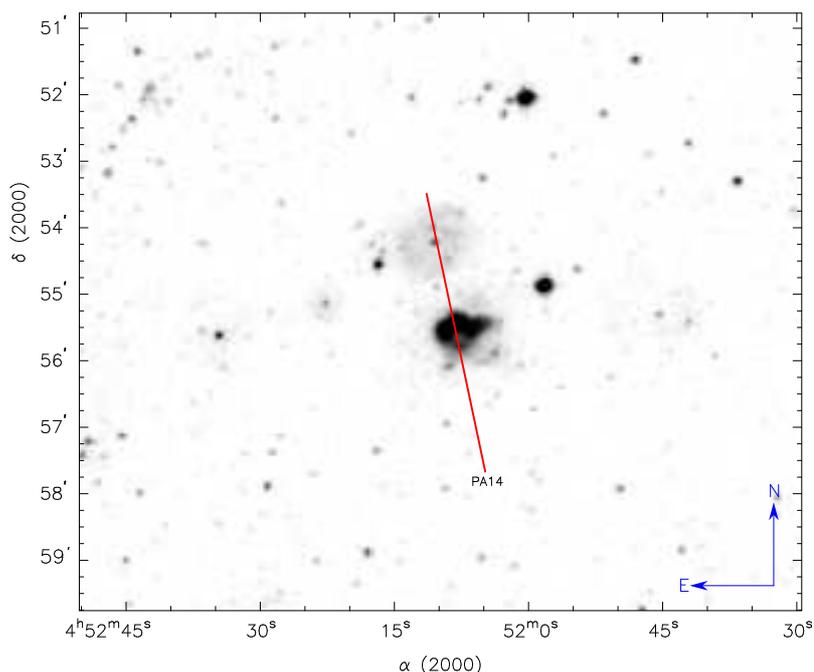


Figura 7 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N4 A. Imagem na banda *SR*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Science and Engineering Research Council* (SERC). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <http://aladin.u-strasbg.fr>. Acesso em 22/07/2009.

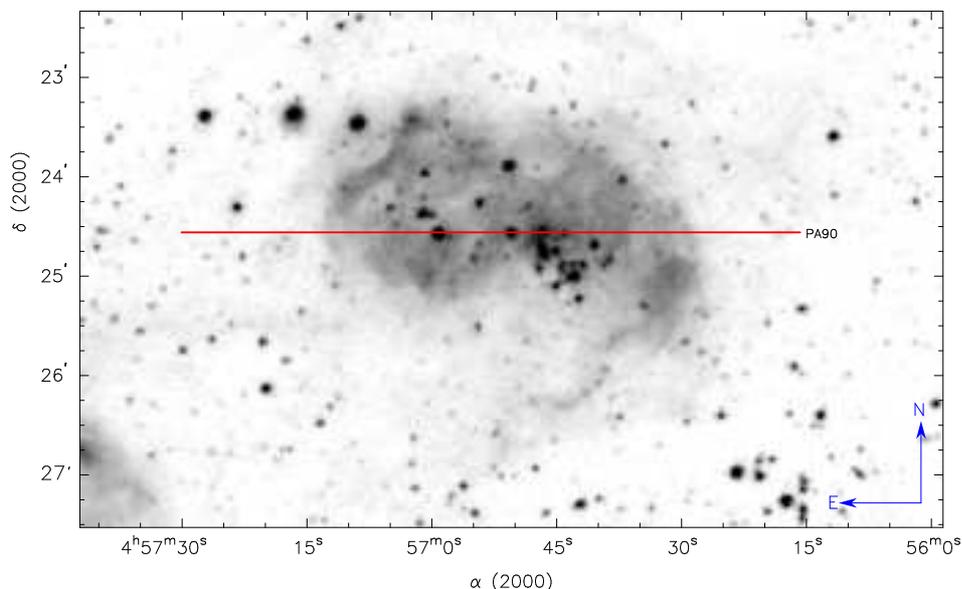


Figura 8 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 B. Imagem na banda *R*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <http://aladin.u-strasbg.fr>. Acesso em 22/07/2009.

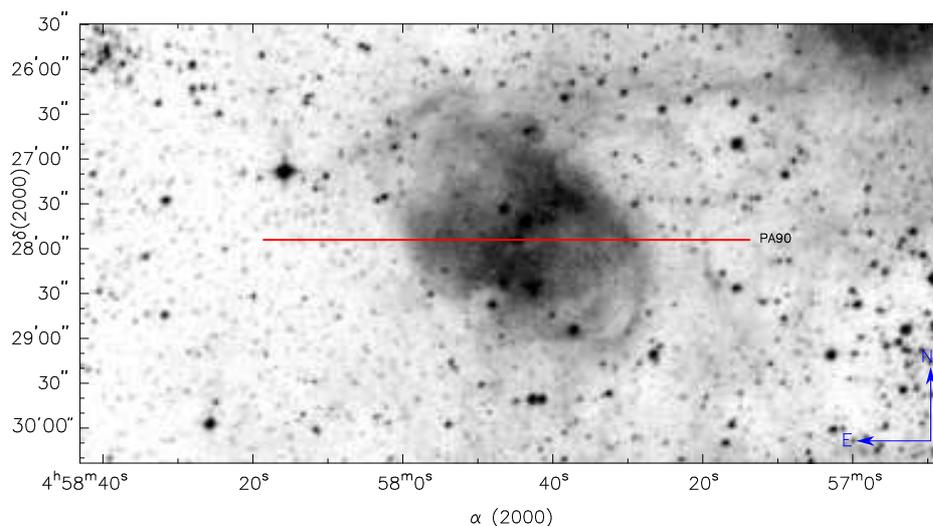


Figura 9 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 C. Imagem na banda *R*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

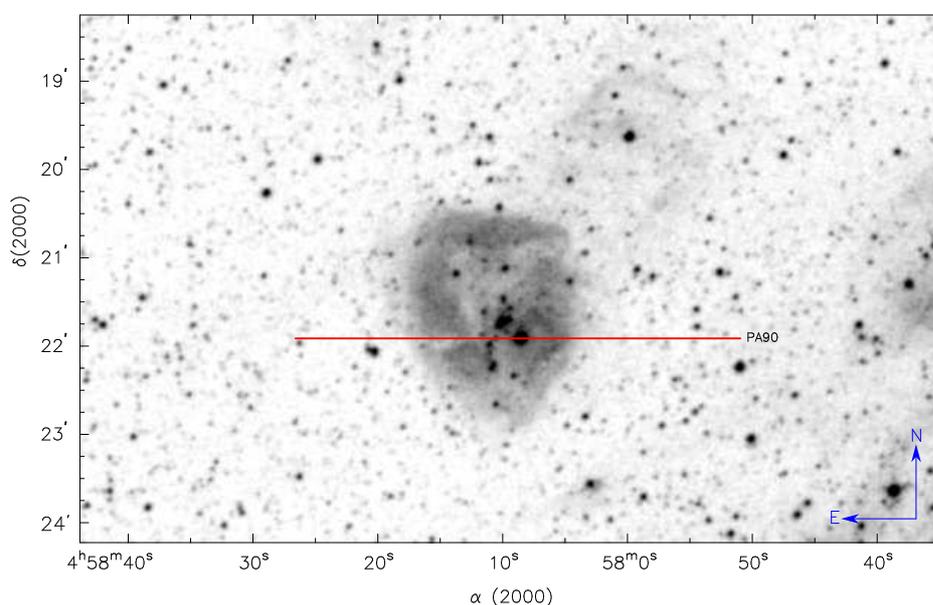


Figura 10 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 E. Imagem na banda *R*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

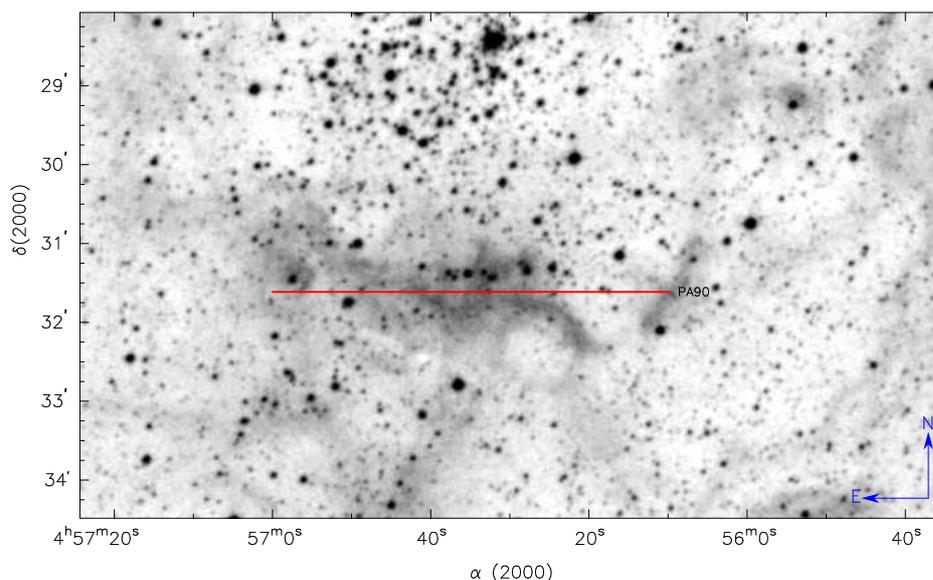


Figura 11 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 F. Imagem na banda *R*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

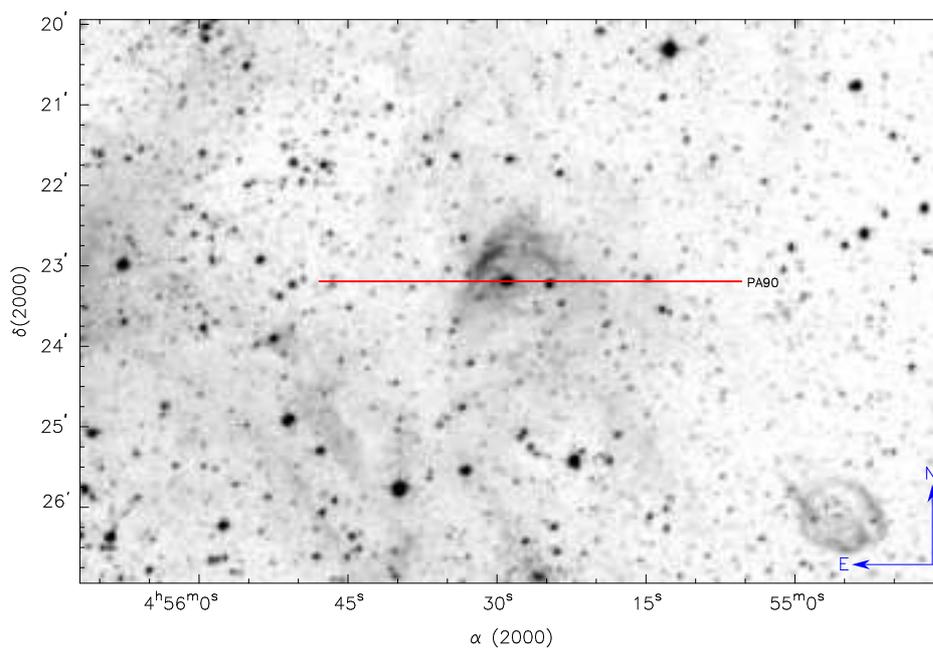


Figura 12 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 G. Imagem na banda *R*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

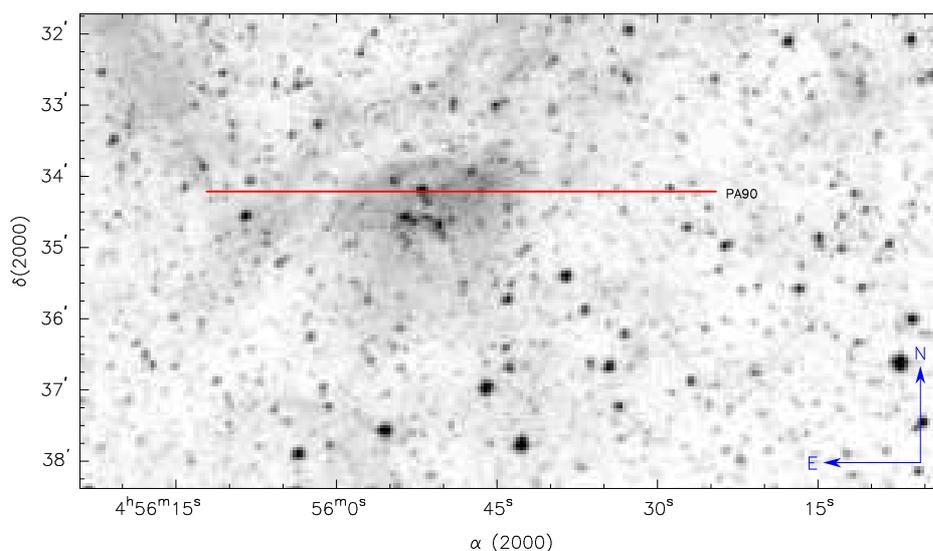


Figura 13 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 I. Imagem na banda *R*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

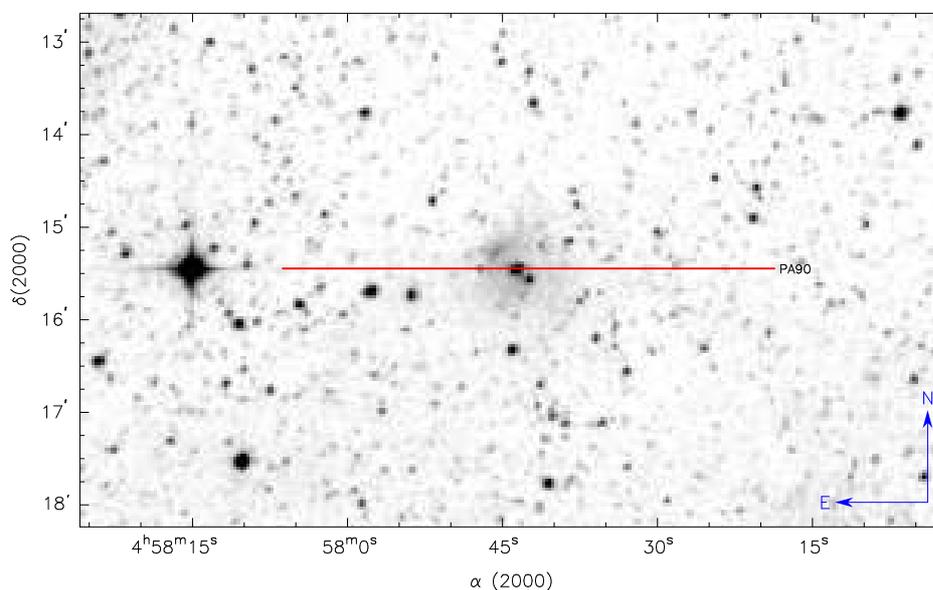


Figura 14 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N11 K. Imagem na banda *R*, número 085, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

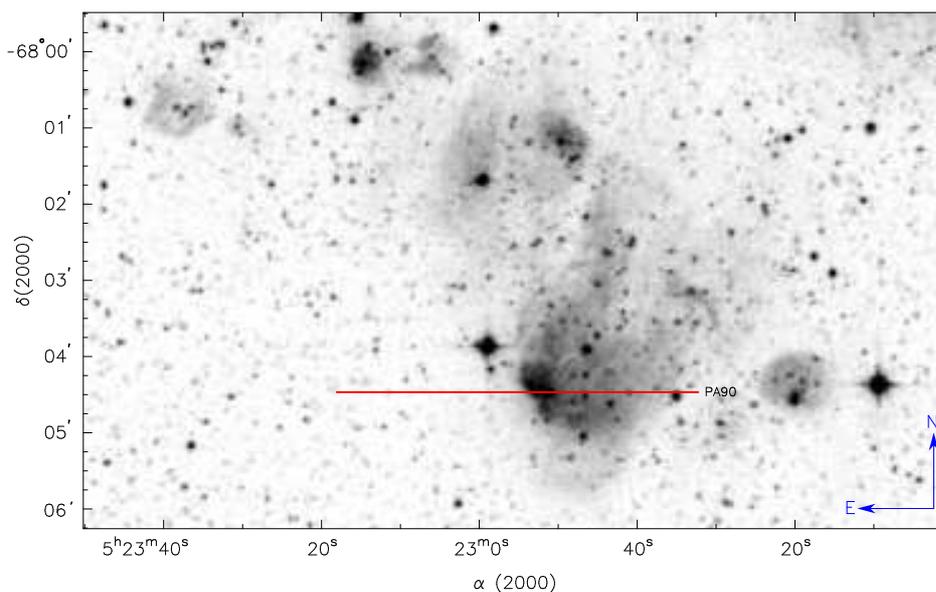


Figura 15 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N44 D. Imagem na banda *R*, número 056, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

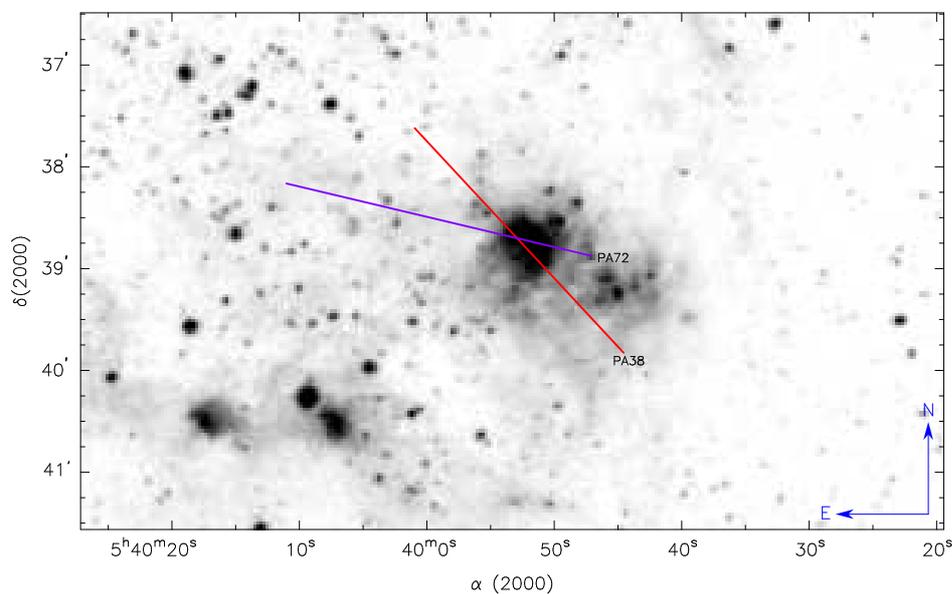


Figura 16 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II GNM: N160 A. Imagem na banda *SR*, número 056, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Science and Engineering Research Council* (SERC). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

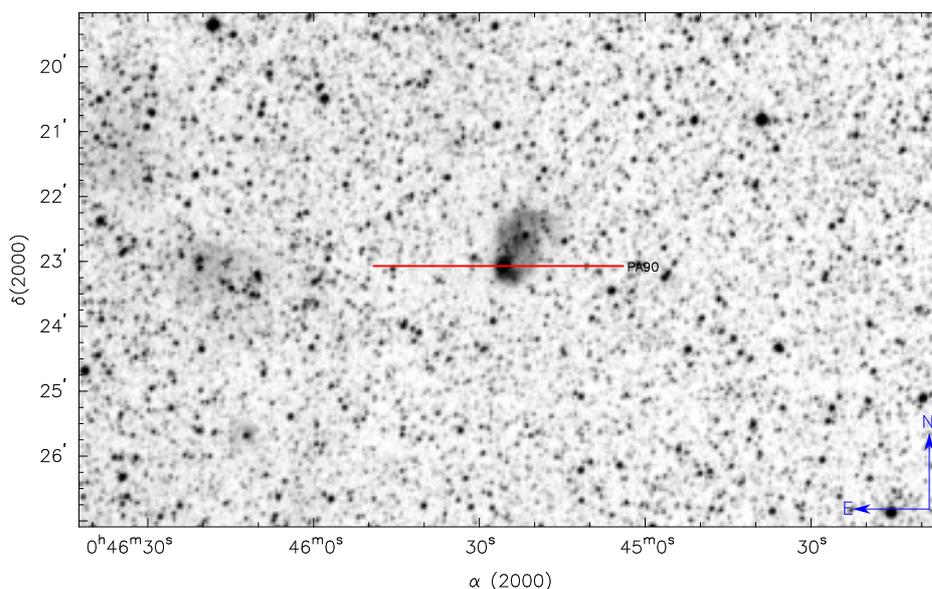


Figura 17 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N13. Imagem na banda *R*, número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

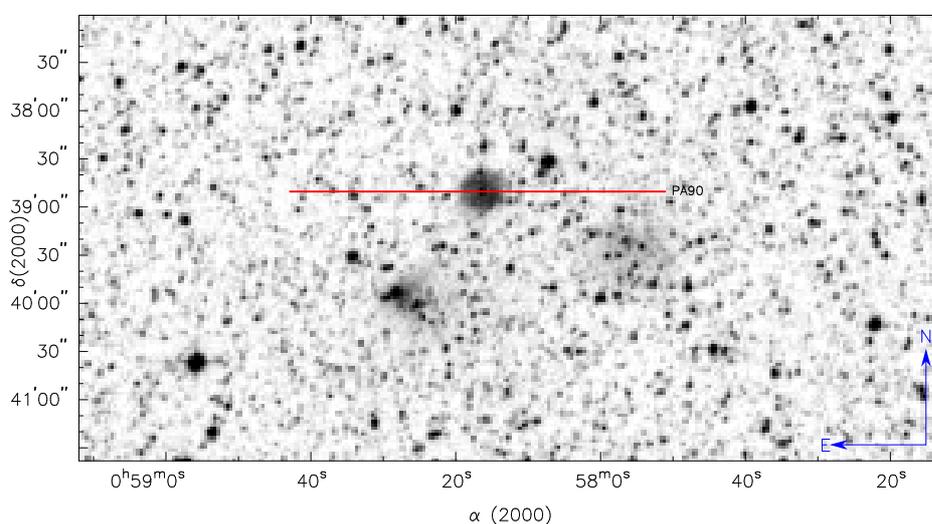


Figura 18 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N63. Imagem na banda *R*, número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

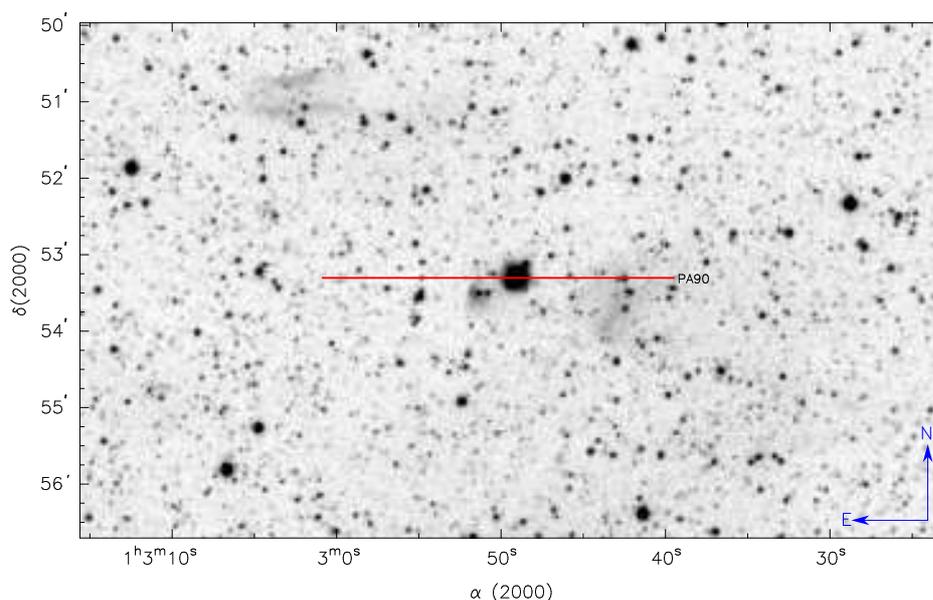


Figura 19 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N77 A. Imagem na banda *R*, número 051, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

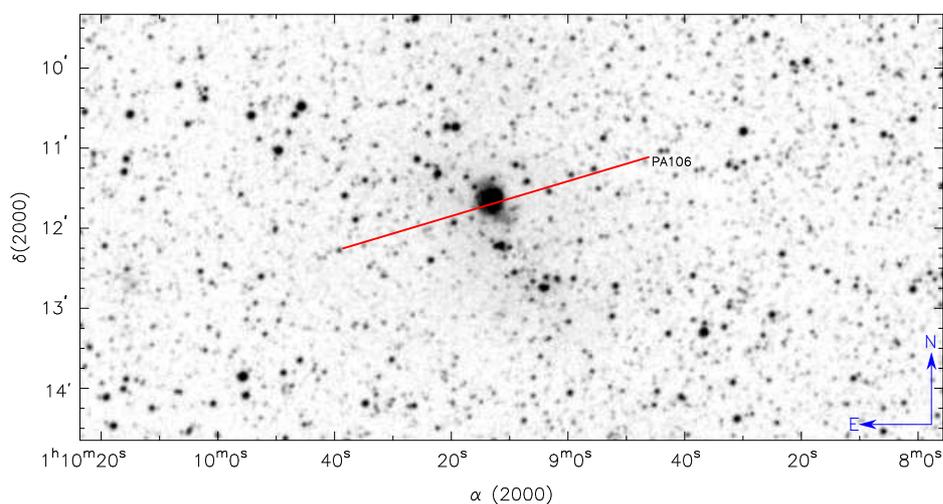


Figura 20 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N81. Imagem na banda *R*, número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

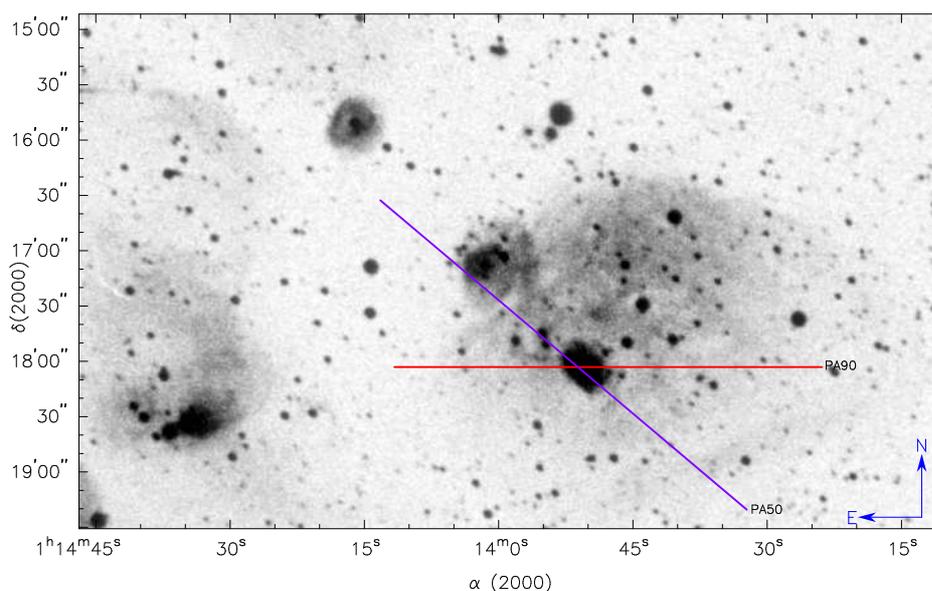


Figura 21 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N83 A,C. Imagem na banda *R*, número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 22/07/2009.

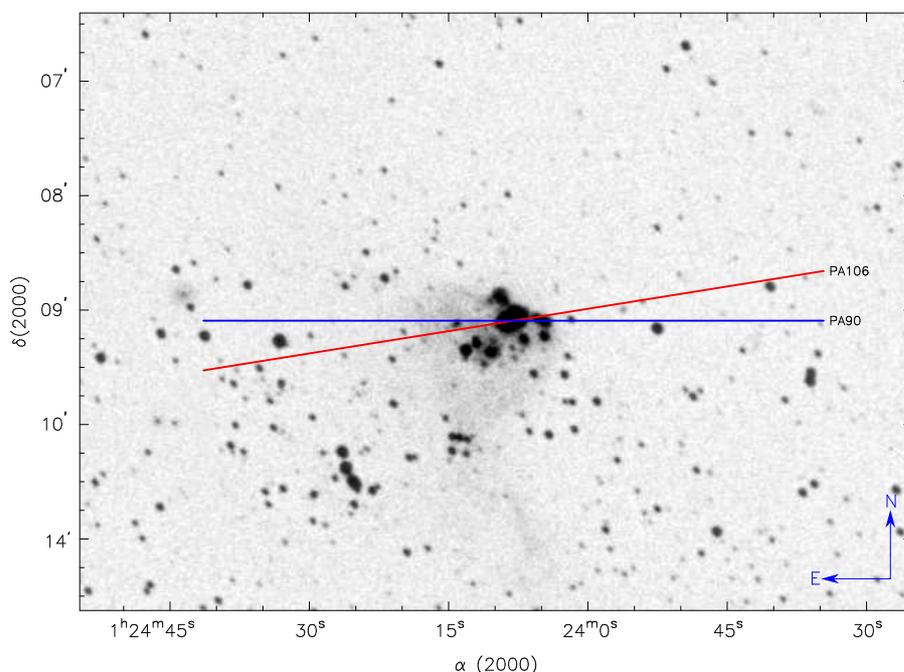


Figura 22 – Representação esquemática das posições de fenda utilizadas para a obtenção dos dados sobre a região H II PNM: N88. Imagem na banda *R*, número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 1* (DSS1) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg* Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 20/01/2010.

Tabela 2 – Resumo das observações espectroscópica de NGC 346 realizadas nos três turnos de observação, com uso do telescópio de 1,60 m do OPD

Posição	Tempo de exposição (s)	Data
Região do Azul		
30'' N	3 × 1200	08.11.02
0''	3 × 1200	08.11.02
30'' S	3 × 1200 + 2 × 600	09.11.02
Região do Vermelho		
40'' N	2 × 1200	09.11.04
35'' N	2 × 1200	22.10.06
30'' N	3 × 1200	08.11.02
25'' N	2 × 1200	22.10.06
20'' N	2 × 1200	09.11.04
15'' N	2 × 1200	22.10.06
10'' N	1 × 1200 + 1 × 600	09.11.04
5'' N	2 × 1200	17.10.06
0''	3 × 1200	08.11.02
5'' S	2 × 1200	22.10.06
10'' S	2 × 1200	09.11.04
15'' S	2 × 1200	22.10.06
20'' S	2 × 1200	09.11.04
25'' S	2 × 1200	22.10.06
30'' S	4 × 1200	09.11.02
35'' S	2 × 1200	23.10.06
40'' S	2 × 1200	09.11.04

3.2 Redução dos dados

A redução dos dados seguiu os procedimentos padrão, ou seja, a correção de *bias* e *flat-fields*, a retirada de raios cósmicos, a calibração em comprimento de onda e fluxo (quando aplicável) e a extração de espectros unidimensionais. Em todos os procedimentos utilizou-se o pacote de análise e redução **IRAF** (*Image Reduction and Analysis Facility*).

Foram realizadas a média das imagens de *bias*, e a sua subtração dos espectros dos objetos, estrelas padrão e lâmpadas de calibração em comprimento de onda. Desta forma, define-se um zero de escala para as contagens medidas no detector, sendo este zero igual ao valor das contagens medidas no CCD sem exposição (*bias*). Para remover os efeitos de ganho não lineares píxel a píxel do detector realiza-se a média das imagens de *flat-fields*. Porém, para preservar o nível de contagens e corrigir as variações de sensibilidade do CCD, assim como as possíveis imperfeições da lâmpada utilizada na obtenção das

Tabela 3 – Resumo das observações espectroscópica realizadas para as demais regiões H II, com uso do telescópio de 1,60 m e de 0,60 m do OPD

Objeto	Centro da Fenda		PA	Tempo de exposição (s)	Data	Observação
	α (2000)	δ (2000)				
GNM						
30 Doradus	5 ^h 38 ^m 42 ^s	-69°06'04''	106	2 × 1200	18.11.92	
	5 38 39	-69 05 28	26	3 × 1200	19.11.93	
	5 38 36	-69 05 08	166	3 × 1200	19.11.92	
	5 38 37	-69 05 21	10	3 × 1200	16.11.93	
	5 38 33	-69 04 50	24	3 × 1200	16.11.93	
	5 38 42	-69 06 04 ^a	90	1 × 1200	14.10.07	$\Delta\delta=30''$ N
			90	1 × 1200	14.10.07	$\Delta\delta=20''$ N
			90	1 × 1200	22.10.06	$\Delta\delta=15''$ N
			90	1 × 1200	12.10.07	$\Delta\delta=10''$ N
			90	2 × 1200	22.10.06	$\Delta\delta=5''$ N
			90	1 × 1200	12.10.07	$\Delta\delta=0''$
			90	1 × 1200	22.10.06	$\Delta\delta=5''$ S
			90	1 × 1200	12.10.07	$\Delta\delta=10''$ S
N4 A	4 52 09	-66 55 25	14	1 × 1200	19.11.92	
N11 B	4 56 47	-66 24 46	90	2 × 1200	17.10.06	
N11 C	4 57 45	-66 27 54	90	3 × 1200	01.02.08	
N11 E	4 58 09	-66 21 53	90	3 × 1200	01.02.08	
N11 F	4 56 25	-66 31 38	90	3 × 1200	01.02.08	
N11 G	4 55 29	-66 23 12	90	2 × 1200	01.02.08	
N11 I	4 55 52	-66 34 13	90	2 × 1200	03.11.08	
N11 K	4 57 44	-66 15 27	90	3 × 1200	03.11.08	
N44 D	5 22 51	-68 04 27	90	2 × 1200	19.11.93	
N160 A	5 39 46	-69 38 40	38	3 × 1200	19.11.93	
			72	3 × 1200		
PNM						
N13	0 ^h 45 ^m 25 ^s	-73°23'04''	90	4 × 1200	26.11.95	
N63	0 58 17	-72 38 51	90	3 × 1200	26.11.95	
N77 A	1 02 49	-71 53 19	90	3 × 1200	24.11.95	
N81	1 09 13	-73 11 39	106	4 × 1200	19.11.92	
N83 A,C	1 13 50	-73 18 03	90	1 × 1200	25.11.95	
	1 13 49	-73 18 05	50	2 × 1200	08.11.04	
N88	1 25 13	-72 53 19	106	3 × 1200	19.11.92	
			90 ^b	4 × 1200	01.08.08	

^a centro da fenda da posição $\Delta\delta=0''$;

^b única observação realizada com o telescópio de 0,60 m de diâmetro do OPD.

Catálogos: DEM = Davies *et al.* (1976); N = Henize (1956)

imagens de *flat-fields* normaliza-se a imagem média obtida, seguindo pela divisão dos espectros de interesse, já subtraídos da média dos *bias*, por esta média normalizada. Os

raios cósmicos identificados nos espectros dos objetos, das estrelas padrão e das lâmpadas foram removidos de forma interativa, por meio da rotina *imedit* do **IRAF**.

Para NGC 346 extraíram-se de cada espectro bidimensional espectros unidimensionais em janelas de 9 píxeis, o equivalente a aproximadamente $5''$. Na região do vermelho, com 17 espectros bidimensionais, obteve-se um total de 1020 espectros unidimensionais; e para a faixa do azul, com três posições de fenda, resultou em 179 espectros unidimensionais. Para as medidas de densidade eletrônica em todos os objetos da amostra, extraíram-se espectros unidimensionais em janelas de tamanho fixo igual a aproximadamente $2''$, equivalente ao valor médio do *seeing* local. Isto foi possível pois os espectros obtidos apresentavam boa qualidade, ou seja, com alto sinal-ruído. Dos espectros bidimensionais das estrelas padrão foi extraído um espectro unidimensional de 20 píxeis, equivalente a $11''$, com a abertura centrada nessa estrela.

Nas observações que se utiliza um deslocamento na posição da fenda no sentido Norte-Sul, como o caso de NGC 346 e 30 Doradus, é comum ocorrer um desvio não desejado da fenda na direção Leste-Oeste. Para compensar este possível desvio, durante a extração dos espectros unidimensionais destas nebulosas, utilizou-se uma estrela de referência no espectro de posição $0''$. Possibilitando uma posterior identificação da posição relativa dos demais espectros bidimensionais em relação à estrela de referência, por meio de uma triangulação de coordenadas entre as estrelas presentes no espectro bidimensional e as coordenadas da estrela de referência. Desta forma, foi possível um alinhamento dos resultados para uma melhor comparação e a construção dos mapas de intensidade de linha $H\alpha$ e de densidade eletrônica, bem como da velocidade radial de NGC 346.

Para a calibração em comprimento de onda foram extraídos espectros unidimensionais de cada espectro bidimensional de lâmpadas de He-Ar para a região do azul, e de Ne-Ar para a região do vermelho. Posteriormente, foram identificadas as linhas de emissão presentes no espectro, seguindo da calibração dos espectros unidimensionais dos objetos referentes àquele espectro de lâmpada e das estrelas padrão em comprimento de onda. Para os espectros das estrelas padrão determinou-se uma função de sensibilidade relacionando os fluxos conhecidos com as medidas encontradas em contagens, o resultado foi utilizado na calibração em fluxo das observações realizadas entre 2002 e 2008.

Com a finalidade de ilustração da qualidade dos espectros obtidos é apresentado o espectro de NGC 346 na região do azul (Figura 23) e na região do vermelho (Figura 24), em ambos os casos os espectros se referem a posição $0''$ e a abertura sobre a estrela de referência. Para o primeiro espectro destaca-se as linhas $H\gamma$ ($\lambda 4340$), $H\beta$ ($\lambda 4861$) e $[O III]$ ($\lambda 4958$ e $\lambda 5007$). A linha do $[O III]$ ($\lambda 4363$), apesar de não ser facilmente percebida nos espectros nebulares, pode ser detectada nos espectros obtidos para NGC 346 possibi-

tando uma estimativa direta da temperatura eletrônica. O espectro unidimensional na faixa do vermelho apresenta em destaque a linha $H\alpha$ ($\lambda 6563$) e as linhas do duplete de $[S\text{II}]$ ($\lambda 6717$ e $\lambda 6731$) utilizadas na estimativa da densidade eletrônica.

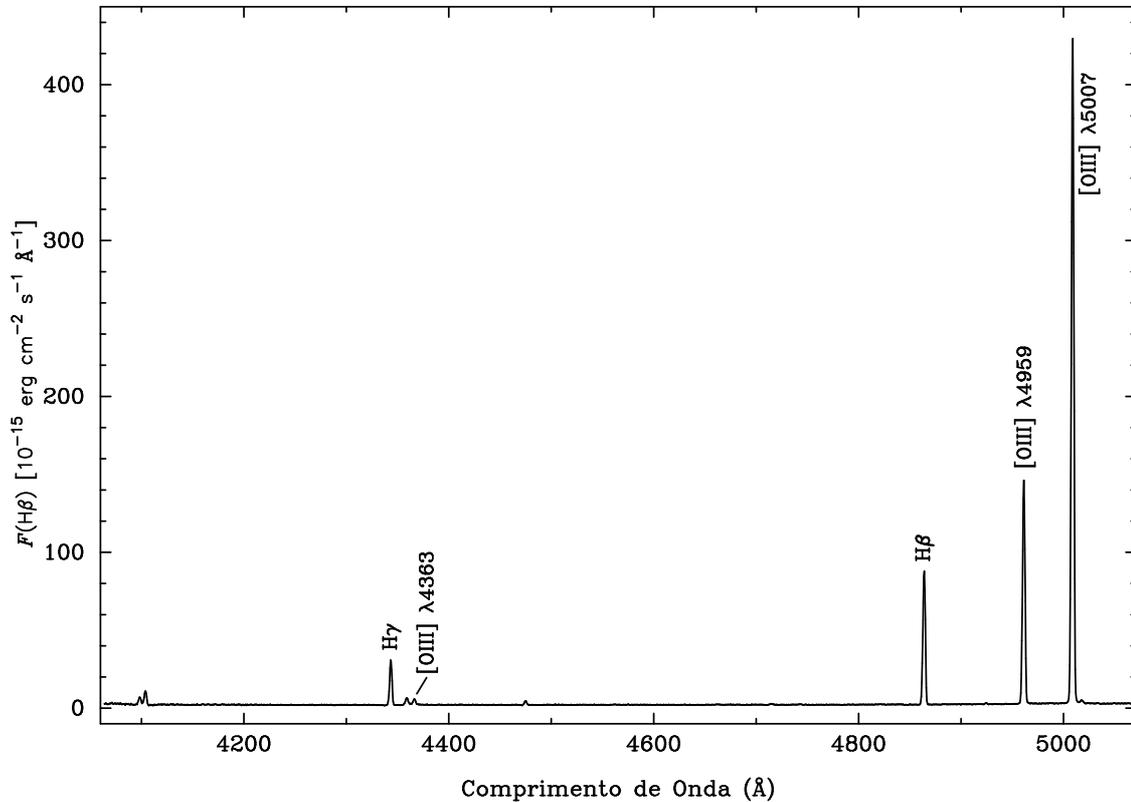


Figura 23 – Espectro de NGC 346 na região do azul (4060 a 5070 Å), obtido com fenda na posição $0''$ e sobre a estrela de referência.

3.3 Medidas do fluxo das linhas de emissão

As intensidades das linhas de emissão observadas nos espectros das nebulosas foram medidas para cada espectro unidimensional calibrado, utilizando a tarefa *fitprof* do **IRAF**. Esta tarefa realiza uma medida automatizada com uma alta precisão quando as linhas apresentam uma forma gaussiana. Caso a linha não apresente esta forma optou-se pela tarefa *splot*, também do **IRAF**, que realiza as medidas de forma interativa. Assumindo que o fluxo de fótons segue uma distribuição de Poisson, pode-se propagar de erro das medidas de linha de emissão partindo de (BEVINGTON, 1969):

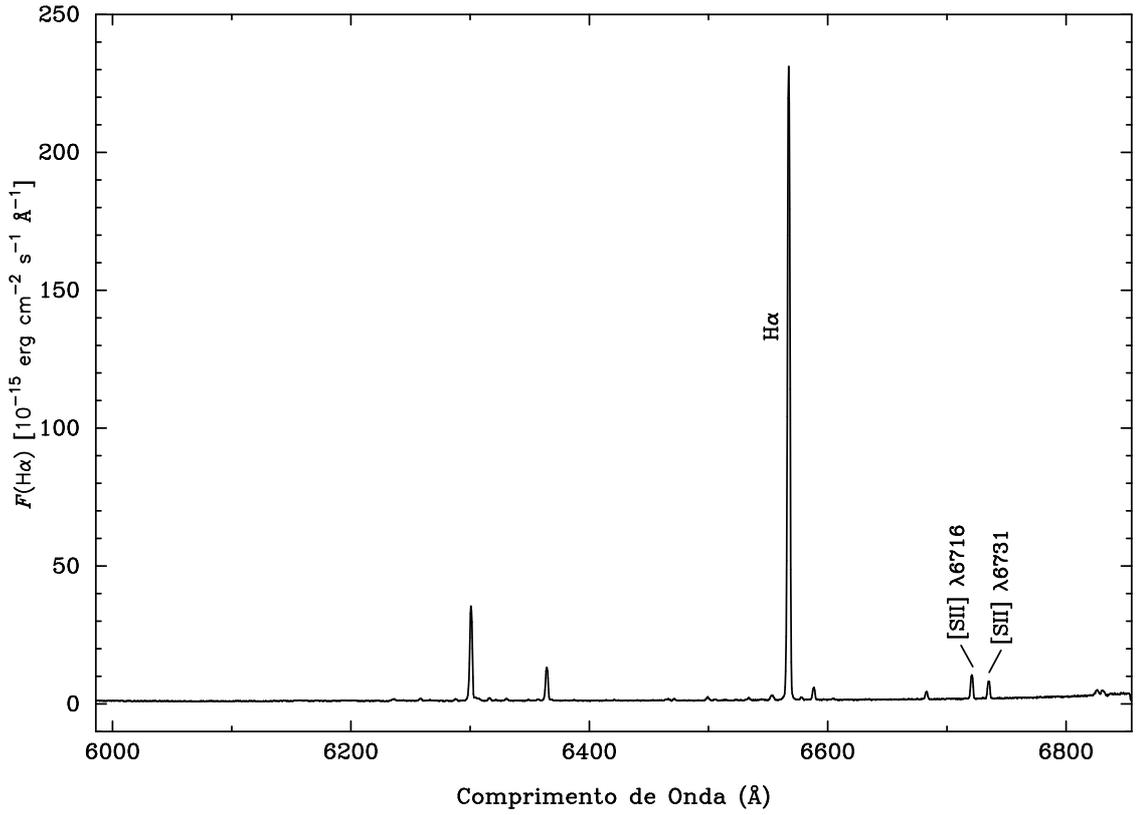


Figura 24 – Espectro de NGC 346 na região do vermelho (5080 a 6900 Å), obtido com fenda na posição 0'' e sobre a estrela de referência.

$$\sigma_{\lambda}^2 = \sigma_{\text{cont}}^2 + \sigma_{\text{linha}}^2, \quad (3.1)$$

sendo:

σ_{λ} = erro na medida da intensidade da linha com comprimento de onda λ ;

σ_{cont} = erro quadrado médio (RMS) do contínuo medido próximo à λ ;

σ_{linha} = erro poissônico da medida da linha.

Reescrevendo, resulta em:

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{m(\Delta\lambda\sigma_{\text{cont}})^2 + \alpha F_{\text{calib}}}, \quad (3.2)$$

sendo:

σ_{λ} = erro na medida da intensidade da linha com comprimento de onda λ ;

m = largura na base da linha medida em píxeis;

$\Delta\lambda$ = dispersão do comprimento de onda em píxel;

σ_{cont} = erro quadrado médio (RMS) do contínuo medido próximo à λ ;

α = razão entre o fluxo calibrado (F_{calib}) e o fluxo em contagens.

A introdução do parâmetro α se deve ao fato do erro de Poisson ser proporcional às contagens, e sendo as linhas de emissão medidas em espectros calibrados em fluxo, se faz necessário o ajuste das unidades para uma correta estimativa dos erros. Desta forma, considera-se as incertezas ocasionadas pela própria natureza da observação, pela retirada de raios cósmicos e pelas próprias medidas das linhas.

3.3.1 Correção por avermelhamento

O avermelhamento é definido como a extinção interestelar que diminui o fluxo das linhas de percebidas em um detector, sendo esta diminuição inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz. Esse evento ocasiona uma maior intensidade relativa de fluxo recebido na região do espectro do vermelho com relação a do azul. Portanto, ao se estimar as propriedades físicas de uma região H II se faz necessário a correção por avermelhamento, visto que os valores de fluxo medidos das linhas de emissão sofrem atenuações. A consequência da atenuação desigual é percebida nos valores da razão de linhas utilizadas como sensores de temperatura eletrônica que serão superestimados quando não efetuada esta correção.

Osterbrock (1989) fornece a seguinte equação para a correção por avermelhamento:

$$\frac{I_\lambda}{I_{H\beta}} = \frac{I_{\lambda_o}}{I_{H\beta_o}} 10^{-C(H\beta) [f(\lambda) - f(H\beta)]}, \quad (3.3)$$

sendo:

I_λ e $I_{H\beta}$ = intensidade observada com o comprimento de onda λ e $H\beta$;

I_{λ_o} e $I_{H\beta_o}$ = intensidade no comprimento de onda λ e $H\beta$ sem a ação do avermelhamento;

$f(\lambda)$ e $f(H\beta)$ = função da extinção interestelar com o comprimento de onda λ e $H\beta$;

$C(H\beta)$ = coeficiente de extinção interestelar em $H\beta$.

A equação 3.3 está em função da linha $H\beta$ ($\lambda 4861$), sendo as correções realizadas pela comparação do valor intrínseco da linha com o valor observado. Dessa forma, é necessário obter o valor do coeficiente $C(H\beta)$ para o objeto de estudo, que pode ser estimado pelo uso das linhas da Série de Balmer do Hidrogênio, como por exemplo, a razão de linhas $I_{H\alpha_o}/I_{H\beta_o}$ ($=2,86$), ou ainda, $I_{H\gamma_o}/I_{H\beta_o}$ ($=0,481$). A função $f(\lambda)$ pode ser estimada com a rotina *redcor* do pacote *stsdas.nebular* do **IRAF**, informando-se o comprimento de onda de interesse e a lei de avermelhamento a ser utilizada. Para os dados deste trabalho foi utilizada a lei de avermelhamento para a PNM (PREVOT *et al.*, 1984), isto porque a correção só foi aplicada aos dados obtidos de NGC 346. As demais nebulosas observadas não sofreram qualquer correção por avermelhamento, pois as

medidas de densidade eletrônica via razão de linhas do [S II] não exigem este procedimento. Então, aplicando a equação 3.3 para NGC 346, pelo cálculo do valor do coeficiente de extinção interestelar foi possível corrigir os fluxos de todas as linhas medidas.

Para obtenção de todas as medidas de fluxo em relação à $H\beta$, realizou-se a propagação dos erros referente ao cálculo destes fluxos relativos a $H\beta$, utilizando a seguinte equação:

$$\sigma_r = \frac{I_\lambda}{I_{H\beta}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{I_\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{H\beta}}{I_{H\beta}}\right)^2}, \quad (3.4)$$

sendo:

I_λ e $I_{H\beta}$ = intensidade medida da linha λ e $H\beta$;

σ_λ e $\sigma_{H\beta}$ = erro de Poisson estimado pela equação 3.2 para o comprimento de onda λ e de $H\beta$.

Para o coeficiente de extinção $C(H\beta)$ o erro foi estimado por:

$$\sigma_{C(H\beta)} = \frac{\log(e) \sigma_r}{f(\lambda) F(\lambda)}, \quad (3.5)$$

sendo:

$F(\lambda)$ = fluxo medido em λ em relação à linha $H\beta$;

σ_r = erro estimado pela equação 3.4;

$f(\lambda)$ = função de avermelhamento para λ ;

λ = comprimento de onda da linha utilizada para estimar $C(H\beta)$, 4340Å ($H\gamma$) para a região azul do ótico e 6563Å ($H\alpha$) para a região do vermelho.

Por fim, os erros referentes às correções por avermelhamento foram calculados utilizando:

$$\sigma_c = \sqrt{[10^{C(H\beta)} f(\lambda) \sigma_r]^2 + [10^{C(H\beta)} f(\lambda) f(\lambda) F(\lambda) \ln 10 \sigma_{C(H\beta)}]^2}, \quad (3.6)$$

sendo:

$f(\lambda)$ = função de avermelhamento para λ ;

$C(H\beta)$ = coeficiente de extinção interestelar em $H\beta$;

σ_r = erro estimado para o fluxo relativo a $H\beta$;

$F(\lambda)$ = fluxo medido em λ em relação à linha $H\beta$;

$\sigma_{C(H\beta)}$ = erro estimado para o coeficiente de extinção.

3.3.2 Fluxos corrigidos das linhas de emissão

A tabela 4 apresenta os fluxos medidos e corrigidos por avermelhamento das principais linhas de emissão observadas para a posição $0''$ na abertura sobre a estrela de referência de NGC 346. Os valores apresentados estão normalizados em $I(\text{H}\beta) = 100$, com $\log F(\text{H}\beta) = -12,44$, em unidades de $\text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Estimou-se o valor da extinção logarítmica em $\text{H}\beta$ para cada região espectral em cada posição de fenda observada, ou seja, em função da razão $\text{H}\gamma/\text{H}\beta$ para a região do azul, e em função da razão $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ para a região do vermelho.

Tabela 4 – Principais linhas de emissão observadas e medidas sobre a região H II NGC 346. Dados coletados para a posição $0''$ na abertura sobre a estrela de referência

Linha	Comprimento de onda (Å)	$F(\lambda)^1$	$f(\lambda)^2$	$C(\text{H}\beta)$	$I(\lambda)^3$
H δ	$\lambda 4101$	12,95	0,202	2,64	44,32
H γ	$\lambda 4340$	21,11	0,130	2,64	46,60
[O III]	$\lambda 4363$	3,57	0,124	2,64	7,57
HeI	$\lambda 4471$	1,25	0,095	2,64	2,21
H β	$\lambda 4861$	100,00	0,000	2,64	100,00
[O III]	$\lambda 4959$	216,48	-0,022	2,64	189,35
[O III]	$\lambda 5007$	812,62	-0,032	2,64	667,98
HeI	$\lambda 5015$	5,73	-0,034	2,64	4,65
[S II]	$\lambda 6312$	8,17	-0,260	2,52	1,81
[N II]	$\lambda 6548$	22,31	-0,292	2,52	4,11
H α	$\lambda 6563$	1576,41	-0,294	2,52	287,00
C II	$\lambda 6578$	5,17	-0,295	2,52	0,93
[N II]	$\lambda 6583$	48,39	-0,296	2,52	8,67
HeI	$\lambda 6678$	15,48	-0,309	2,52	2,58
[S II]	$\lambda 6716$	58,62	-0,313	2,52	9,52
[S II]	$\lambda 6731$	50,88	-0,315	2,52	8,18

¹ intensidade logarítmica em relação a $F(\text{H}\beta) = 100$;

² função de avermelhamento para o comprimento de onda λ ;

³ intensidade corrigida pelo avermelhamento em relação a $I(\text{H}\beta) = 100$.

Em algumas aberturas foi possível medir linhas menos intensas, tais como as linhas do [Ar IV] ($\lambda 4711$) e Fe III ($\lambda 4924$ e $\lambda 4985$) na região do azul, e as linhas Si II ($\lambda 6347$ e $\lambda 6371$) e Ni III ($\lambda 6533$) na região do vermelho. Não foi possível resolver as linhas do Ni II ($\lambda 6813$), Si II ($\lambda 6818$) e Mn III ($\lambda 6821$) na região do vermelho, no entanto estas foram detectadas.

3.4 Densidade eletrônica

Neste trabalho, utilizou-se como sensor de densidade eletrônica a razão de linhas do [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$, por serem linhas próximas entre si, além de se encontrarem na região do vermelho no espectro visível, faixa na qual o detector do tipo CCD é mais sensível.

O erro referente à razão das linhas medidas para o [S II] foi estimado por:

$$\sigma_{r_{[SII]}} = \frac{I_{6716}}{I_{6731}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{6716}}{I_{6716}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{6731}}{I_{6731}}\right)^2}, \quad (3.7)$$

sendo:

I_{6716} e I_{6731} = intensidade medida da referida linha;

σ_{6716} e σ_{6731} = erro estimado pela equação 3.2.

Para cada espectro unidimensional obtido na região do vermelho foram medidas as linhas do duplete de Enxofre $\lambda 6716/\lambda 6731$ e a linha $H\alpha$, que por sua vez foi utilizada como delimitadora da nebulosa. Como mencionado na seção anterior, nesse processo não foi realizada a correção por avermelhamento, pois as linhas do duplete de Enxofre estão muito próximas entre si (por aproximadamente 15 Å) sofrendo praticamente o mesmo efeito. Após estimar a razão de linhas do [S II] foi possível calcular a densidade eletrônica por meio da rotina *temden* do pacote *stsdas.nebular* do **IRAF**. Essa rotina estima o valor de densidade eletrônica com a solução numérica do modelo de átomos de 5 níveis, e esta só converge para uma solução quando a razão de linhas do [S II] estiver entre 0,46 e 1,43. A rotina *temden* utiliza como parâmetros de entrada, além do valor numérico da razão de linha, o íon utilizado na medida das linhas, o grau de ionização deste átomo e a temperatura eletrônica. No presente trabalho utilizou-se o íon enxofre, com dois graus de ionização e temperatura eletrônica de 10 000 K. Esta temperatura foi escolhida por representar o valor teórico esperado para regiões H II, porém quando havia na literatura a estimativa de temperatura eletrônica para a nebulosa de estudo, este valor foi utilizado (Tabela 5). Na realidade o valor adotado não exerce grande influência nos cálculos, pois existe uma fraca dependência da densidade eletrônica com a temperatura eletrônica.

3.5 Temperatura eletrônica

Neste trabalho, para o cálculo da temperatura eletrônica utilizou-se a razão de linhas do [O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$. Para cada abertura obtida dos espectros bidi-

Tabela 5 – Temperatura eletrônica utilizada nas estimativas de densidade eletrônica. Valores obtidos na literatura

Objeto	T_e (K) adotada	Ref.
GNM		
30 Doradus	10 350	[1], [2], [3], [4]
N 4 A	9 620	[1] [5], [2]
N 11 B	9 400	[6], [3]
N 160 A	9 700	[6], [7], [8], [2]
PNM		
N 13	12 000	[9]
N 81	12 400	[10], [11], [12], [13], [8], [2]
N 83 A/C	12 500	[6], [14], [10], [9], [8]
N 88	13 500	[10], [13], [2]
NGC 346	12 270	[15]

Referências: [1] Peimbert & Torres-Peimbert (1974), [2] Vermeij *et al.* (2002b), [3] Tsamis *et al.* (2003), [4] Krabbe & Copetti (2002), [5] Heydari-Malayeri *et al.* (1994), [6] Dufour (1975), [7] Heydari-Malayeri & Testor (1986), [8] Kurt & Dufour (1998), [9] Pagel *et al.* (1978), [10] Dufour & Harlow (1977), [11] Dufour & Killen, [12] Dufour *et al.* (1982), [13] Wilcots (1994), [14] Peimbert & Torres-Peimbert (1976), [15] Oliveira *et al.* (2008).

mensionais foram medidos os fluxos das linhas de [O III] $\lambda 4363$, $\lambda 4959$ e $\lambda 5007$ e as linha $H\beta$ e $H\gamma$, sendo estas últimas utilizadas na correção por avermelhamento para NGC 346. É de grande importância realizar a correção por avermelhamento para as linhas de [O III], que deve ser feita antes de se estimar a temperatura eletrônica, pois a linha de comprimento de onda $\lambda 4363$ está a cerca de 600 Å de distância das demais ($\lambda 4959$ e $\lambda 5007$), sofrendo um avermelhamento mais intenso.

O erro referente à razão das linhas medidas para o [O III] foi estimado utilizando:

$$\sigma_{r_{[O III]}} = \frac{I_{4959} + I_{5007}}{I_{4363}} \sqrt{\left[\frac{(\sigma_{4959}^2 + \sigma_{5007}^2)^{1/2}}{I_{4959} + I_{5007}} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_{4363}}{I_{4363}} \right]^2}, \quad (3.8)$$

sendo:

I_{4959} , I_{5007} e I_{4363} = intensidade medida da referida linha;

σ_{4959}^2 e σ_{5007}^2 = erro quadrado referente às linhas $\lambda 4959$ e $\lambda 5007$;

σ_{4363} = erro referente à linha $\lambda 4363$.

Para se estimar a temperatura eletrônica foi utilizada a rotina *temden* do **IRAF**,

tendo-se como parâmetros de entrada o valor da razão de linha do [O III], o íon utilizado como sensor (Oxigênio), o grau de ionização deste átomo (três) e a densidade eletrônica (100 cm^{-3}). Para NGC 346, único objeto da amostra que foi estimado a temperatura, adotou-se como densidade eletrônica o valor dado pela moda das estimativas anteriormente realizadas no presente trabalho, ou seja, o valor mais comum estimado para essa nebulosa. Assim como na estimativa de densidade eletrônica, indicado na seção anterior, o valor adotado de densidade na execução da rotina *temden* não exerce grande influência na estimativa da temperatura eletrônica, devido a baixa dependência desta com o valor da densidade no modelo de átomos de 5 níveis. Neste trabalho, o erro na estimativa da temperatura eletrônica devido às incertezas para as densidades eletrônicas encontradas em NGC 346 foi menor que 0,1%, sendo desprezível.

3.6 Mapa superficial

Utilizando as estimativas de densidade eletrônica ponto a ponto obtidas para NGC 346 foi possível construir um mapa de distribuição superficial de densidade. Para tanto foi gerado um arquivo texto com as densidades, sendo que cada linha indica uma posição (píxel) no mapa. A rotina *rtextimage* do **IRAF** foi utilizada para gerar a imagem partindo deste arquivo texto. Como parâmetros de entrada informa-se as dimensões da imagem final, largura e altura. A largura da fenda utilizada durante a observação dos dados foi de $1,5''$, menor que a distância entre as posições de fenda utilizadas para a construção dos mapas superficiais. Porém, para evitar faixas negras intercalando as posições de fenda nos mapas optou-se por alongar cada píxel na vertical para $5''$, distância referente aos deslocamentos entre duas posições de fenda sucessivas.

O capítulo seguinte apresenta os valores de densidade e temperatura eletrônica, o mapa superficial de densidade eletrônica e os perfis de brilho para a região H II NGC 346. Se destaca a análise estatística de temperatura eletrônica e de flutuação de temperatura eletrônica. Encontra-se, também, a análise dos dados espectroscópicos de 17 nebulosas gasosas pertencentes às Nuvens de Magalhães, junto com os perfis de brilho e densidade eletrônica.

4 *Resultados e Discussões*

4.1 Propriedades físicas de NGC 346

Utilizando as razões de linha do [O III] em 179 pontos sobre NGC 346 e das respectivas estimativas de temperatura eletrônica realizou-se uma análise estatística, e posteriormente estudo das flutuações internas de temperatura para a região H II NGC 346. A densidade eletrônica foi estimada em 1020 pontos sobre NGC 346 utilizando as razões de linhas do [S II] como sensor de densidade, seguido da construção do mapa superficial para a representação bidimensional da nebulosa.

4.1.1 Análise estatística da temperatura eletrônica

Partindo da formulação geral da média e do desvio padrão ponderados (Apêndice A) obteve-se os dados de temperatura eletrônica T_e e razão R de linhas do [O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$ ponderados, utilizando-se o fluxo em $H\beta$ como peso w_i . Os resultados estão apresentados na tabela 6, com as colunas indicando as posições da fenda sobre NGC 346 durante a observação, conforme anteriormente ilustrado na figura 5 (Capítulo 3).

A média das temperaturas eletrônicas ponderadas pelo fluxo de $H\beta$ para todas as aberturas foi de 12 269 K, com uma dispersão de aproximadamente 6,1% (Tabela 6), dada pelo valor do desvio padrão ponderado, confirmando que as temperaturas estimadas para NGC 346 são relativamente homogêneas, apresentando leves flutuações de amplitude. Tais flutuações são mais intensas nas extremidades dessa nebulosa, com uma fração maior do espalhamento observado ocasionada pelos erros das medidas e uma pequena fração referente às flutuações reais de temperatura eletrônica. Reforçando a homogeneidade, tem-se que 50% das temperaturas eletrônicas estimadas, dado pelo intervalo inter-quartis, apresentam uma dispersão de 4,4% da mediana de temperatura.

As figuras de 25 a 27 representam os perfis de brilho em $H\beta$, de razão de linhas de [O III] e de temperatura eletrônica. As medidas de $H\beta$ estão indicadas no perfil, porém, optou-se por não apresentar as barras de erro por serem insignificantes em relação aos

Tabela 6 – Resumo da estatística para a razão de linhas do [O III] e a temperatura eletrônica de NGC 346

	Razão de [O III]				T_e (K)			
	30" N	0"	30" S	Σ	30" N	0"	30" S	Σ
N	63	58	58	179	63	58	58	179
mínimo	58	67	96	58	10 082	9 598	9 078	9 078
$Q1$	102	94	120	99	12 140	12 239	11 384	11 786
mediana	112	103	130	111	12 581	12 695	11 657	12 331
$Q3$	118	114	138	126	12 766	13 174	12 235	12 879
máximo	203	239	168	291	16 291	15 142	14 481	16 291
média	112	105	131	115	12 418	12 678	11 713	12 269
desvio padrão	9	10	11	13	635	675	591	751

Σ : valor referente a soma de todas as aberturas;

N : quantidade de espectros unidimensionais utilizados nas medidas ponto-a-ponto;

$Q1$: primeiro quartil (limite dos 25% menores valores da amostra);

$Q3$: terceiro quartil (limite dos 75% menores valores da amostra).

valores medidos. Para uma melhor percepção do objeto em cada posição de fenda, o perfil em $H\beta$ foi interpolado utilizando a função spline cúbica, visando suavizar as ligações entre os pontos.

Durante a observação, a posição de fenda em 30" N foi deslocada para Leste, aproximadamente 70", no intuito de obter um espectro da região de maior brilho em $H\alpha$ de NGC 346, possibilitando uma maior representatividade das estimativas de temperatura eletrônica (Figura 25).

Visto que todo espectro observado é uma integração ao longo da linha de visada e, conseqüentemente, ligeiramente suavizado, as pequenas flutuações espaciais não são percebidas. Porém, medidas ponto-a-ponto são capazes de detectar gradientes internos em toda a nebulosa, revelando variações sistemáticas de larga escala na temperatura eletrônica em observações de alto sinal ruído. Partindo deste princípio, Walter *et al.* (1992) utilizou medidas ponto-a-ponto para a Nebulosa de Órion (NGC 1976), Liu (1998) para NGC 4361 e Garnett & Dinerstein (2001) para a nebulosa planetária NGC 6720. Contudo, utilizando as medidas ponto-a-ponto de temperatura eletrônica dos perfis de NGC 346 não foi percebido um gradiente de temperatura eletrônica significativo (Figuras 26 e 27), exceto para o perfil referente a posição de fenda 30" N, que possui um leve gradiente (Figura 25). Dessa forma, houve a necessidade de uma análise de regressão linear para determinar uma possível correlação entre a posição em ascensão reta e a temperatura eletrônica de NGC 346, com grandezas ponderadas pelo fluxo em $H\beta$. O ajuste da reta sobre os pontos de temperatura eletrônica foi realizado por meio de uma regressão ponderada, pois desta forma possibilita fornecer mais peso estatístico aos pontos cuja estimativa de temperatura é mais relevante, isto é, para NGC 346 seria os pontos

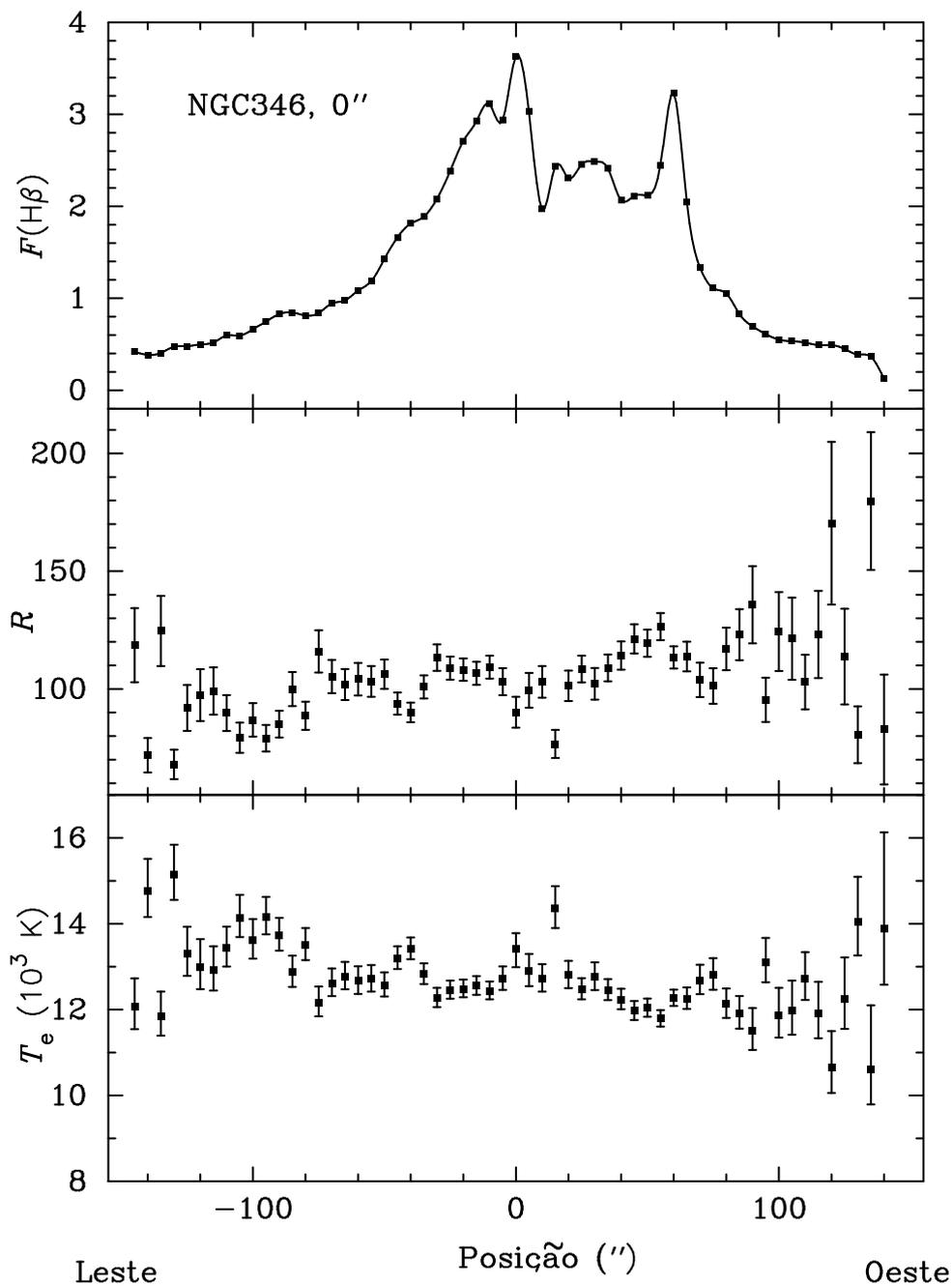


Figura 26 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\beta$ (10^{-13} ergs cm^{-2} s^{-1}) da razão de linhas de $[\text{O III}](\lambda 4659 + \lambda 5007)/\lambda 4363$ (R) e da temperatura eletrônica (K) estimada para NGC 346 na posição de fenda de $0''$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

de maior fluxo em $H\beta$. O apêndice A apresenta as equações utilizadas, assim como as principais deduções.

A posição que apresenta um ajuste linear que melhor indica um gradiente de temperatura eletrônica em NGC 346, ocorreu na posição $30''$ para o Norte da estrela de referência (Figura 28 – topo), seguido da posição $0''$ (Figura 28 – centro). Por outro lado, para a posição $30''$ S o ajuste encontrado não evidencia um gradiente de temperatura (Figura 28 – base). Para a construção do perfil com a regressão linear ponderada, não foi utilizado o critério de seleção da seção do objeto segundo o fluxo em $H\beta$, igual o foi na construção dos perfis de brilho, pois tal critério seria irrelevante visto que se utiliza como peso estatístico o valor do fluxo, e os pontos que seriam excluídos possuem um peso insignificante próximo aos demais. Na figura 28, a regressão linear é indicada pela reta vermelha, cujos coeficientes se encontram na tabela 7. A faixa compreendida entre as retas em azul indica a região onde uma reta de regressão pode ser traçada com 95% de confiança, conforme os erros estimados pelos coeficientes. A faixa entre as curvas verde representa a região de previsão, onde é possível encontrar 95% das medidas realizadas ou previstas.

Tabela 7 – Regressão linear ponderada das medidas de temperatura eletrônica de NGC 346. Foi utilizado como peso estatístico o fluxo da linha $H\beta$

Posição	a	σ_a	b	σ_b	R^2
$30''$ N	12 129	86	-5,61	1,05	0,318
$0''$	12 695	79	-5,66	1,34	0,240
$30''$ S	11 717	76	-1,52	1,27	0,025

a e b : coeficientes linear e angular da reta de ajuste, respectivamente;

σ_a e σ_b : erros dos coeficientes linear e angular, respectivamente;

R^2 : coeficiente de correlação.

Com relação à comparação dos resultados da temperatura eletrônica de NGC 346, observou-se que estes estão de acordo com os obtidos por alguns autores utilizando o mesmo sensor de temperatura (ALLER & FAULKNER, 1962; DUFOUR, 1975; DUFOUR & HARLOW, 1977; PEIMBERT *et al.*, 2000; TSAMIS *et al.*, 2003). No entanto, optou-se por recalcular a temperatura eletrônica obtida por esses autores utilizando os valores da razão de linhas indicadas nos artigos e os parâmetros atômicos adotados neste trabalho, a tabela 8 apresenta os resultados obtidos. Este procedimento foi realizado para minimizar os erros ocasionados exclusivamente pelo método, pois os autores utilizaram modelos e parâmetros atômicos diferentes, o que gera falsas divergências dos resultados. Visto que os autores citados não observaram a mesma área de NGC 346, construiu-se uma figura indicando as posições de fendas adotadas por estes, comparando-as com as posições observadas neste trabalho (Figura 29). Alguns autores dividiram as observações de NGC 346 em seções, cuja nomenclatura adotada foi mantida no presente trabalho.

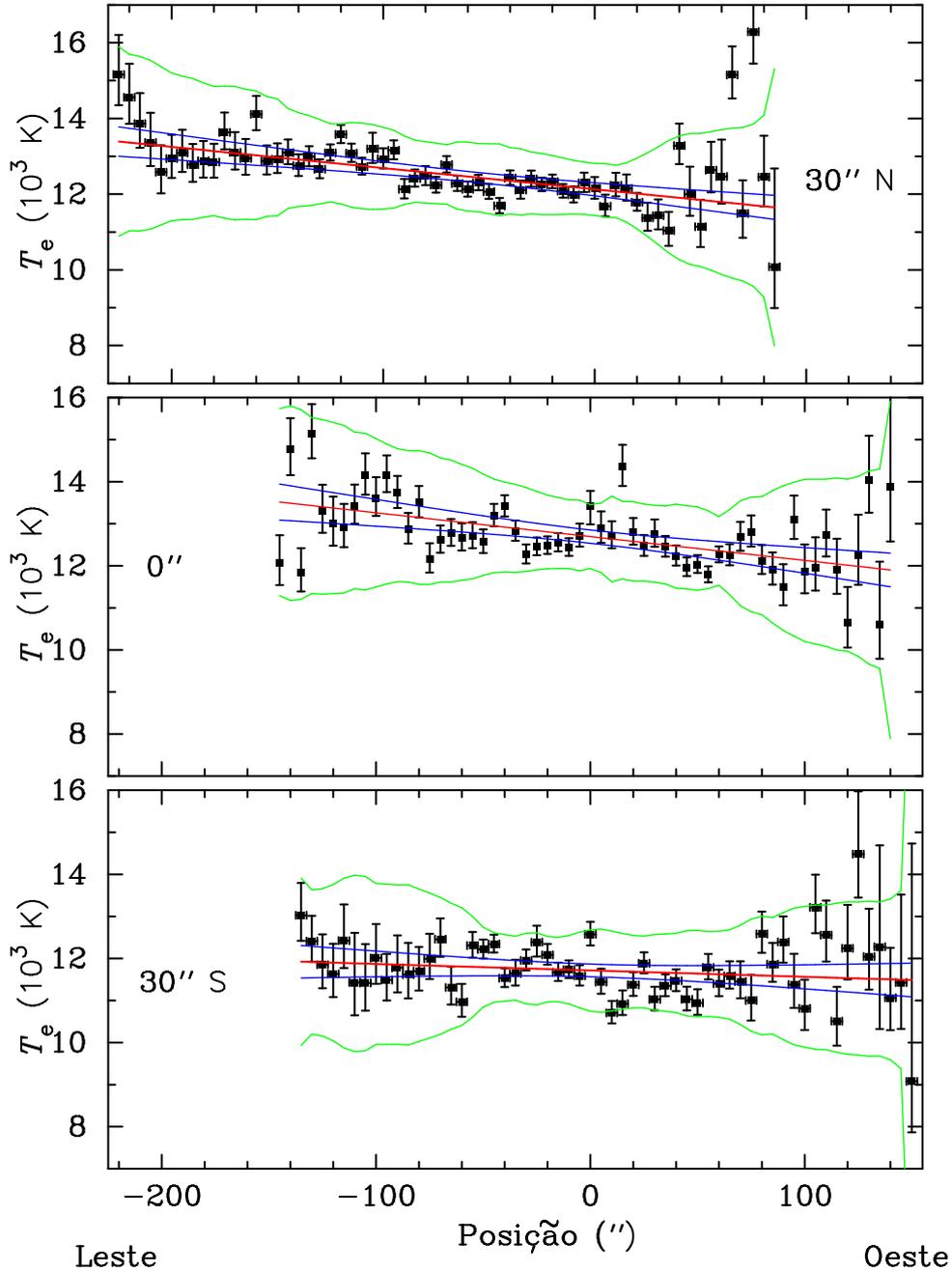


Figura 28 – Perfis de temperatura eletrônica para NGC 346 com a regressão linear. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

As seções de 11 a 18 observadas por Peimbert *et al.* (2000) coincidem com a posição de fenda 0'' utilizada neste trabalho (Figura 29). Assim, foi realizada uma análise de regressão linear ponderada comparando estas medidas, na qual obteve-se coeficiente angular de $-5,23 \pm 0,88 \text{ K arcsec}^{-1}$, equivalendo ao mesmo valor calculado para o trabalho atual ($-5,66 \pm 1,34 \text{ K arcsec}^{-1}$ – Tabela 7). Esse resultado sugere que o mesmo gradiente é percebido para as duas amostras de medidas de temperatura eletrônica. O coeficiente de correlação (R^2) estimado para os dados de Peimbert *et al.* (2000) foi de 0,855, maior

que o calculado para o presente trabalho, com valor de 0,240 (Tabela 7), posição 0". O maior valor de R^2 observado em Peimbert *et al.* (2000) pode ser justificado pela utilização de aberturas com tamanhos maiores que os adotados neste trabalho, resultando em uma menor dispersão dos pontos a serem ajustados.

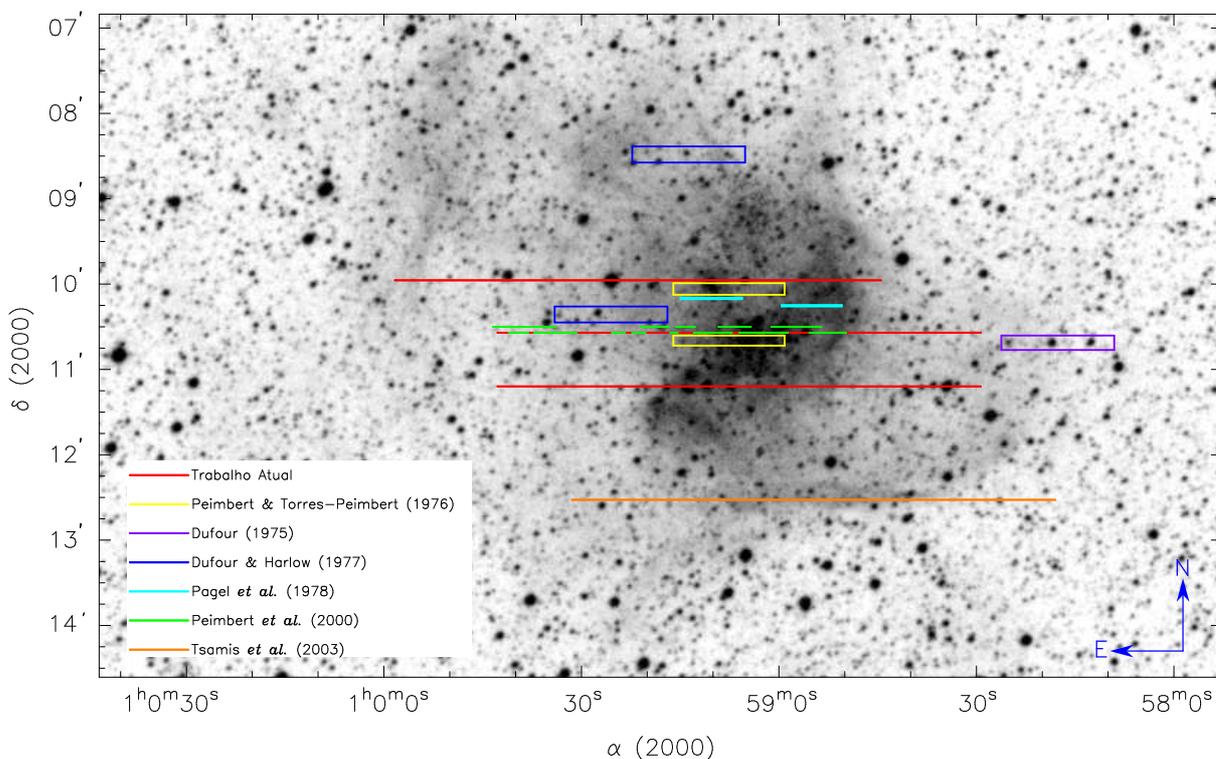


Figura 29 – Representação das posições de fenda utilizadas na estimativa de temperatura eletrônica pelos diversos autores pesquisados na literatura, e as posições utilizadas neste trabalho. Imagem na banda R , número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO). Localizada com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg*. Disponível em <<http://aladin.u-strasbg.fr>>. Acesso em 15/02/2008.

As temperaturas eletrônicas estimadas via a razão de linhas do [O III] obtidas da literatura apresentaram um valor médio de 12 685 K, o que indica ser aproximadamente 3% maior do que o valor encontrado neste trabalho, com uma dispersão de apenas 3,9%. Além disso, para temperatura eletrônica utilizando a razão de linha do [O II] estimou-se 12 153 K, 1% menor do que o valor calculado com os dados do presente trabalho, um valor muito próximo para medidas utilizando diferentes sensores de temperatura (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores recalculados de temperatura eletrônica para NGC 346 utilizando as razões de linhas encontradas na literatura

Razão	T_e (K)	Ref.	Seção	Razão	T_e (K)	Ref.	Seção
[O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$							
99,8	12 875	[1]		105,1	12 625	[2]	
107,4	12 519	[3]		110,9	12 370	[4]	NW
117,9	12 091	[4]	SE	96,6	13 044	[5]	I
96,7	13 040	[5]	II	90,1	13 520	[6]	1-1c
92,6	13 263	[6]	1-2b	130,3	11 665	[6]	2-1c
113,3	12 245	[6]	2-2b	85,7	13 689	[7]	1
92,4	13 279	[7]	2	108,7	12 464	[7]	3
98,5	12 942	[7]	4	87,2	13 590	[7]	5
114,6	12 220	[7]	11	113,2	12 275	[7]	12
111,1	12 363	[7]	13	108,0	12 492	[7]	14
105,5	12 606	[7]	15	99,1	12 916	[7]	16
95,3	13 113	[7]	17	89,1	13 472	[7]	18
108,2	12 487	[8]					
[O II] ($\lambda 3726 + \lambda 3729$)/($\lambda 7320 + \lambda 7330$)							
40,8	11 627	[5]	I	35,5	12 747	[5]	II
43,0	11 707	[7]	1	45,6	11 305	[7]	2
35,4	13 324	[7]	3	35,7	13 262	[7]	4
45,8	11 263	[7]	5	51,8	10 501	[7]	11
41,5	11 974	[7]	12	37,7	12 768	[7]	13
34,0	13 731	[7]	14	24,9	17 902	[7]	15
32,7	14 125	[7]	16	42,6	11 773	[7]	17
33,7	13 813	[7]	18	36,7	12 459	[8]	
[N II] ($\lambda 6548 + \lambda 6583$)/ $\lambda 5755$							
52,22	13 510	[8]					
[S II] ($\lambda 6716 + \lambda 6731$)/($\lambda 4068 + \lambda 4076$)							
15,2	8 613	[7]	12	15,5	8 525	[7]	13
14,0	9 110	[7]	17	10,8	10 792	[8]	

Referências: [1] Aller & Faulkner (1962); [2] Dickel *et al.* (1964); [3] Dufour (1975); [4] Dufour & Harlow (1977); [5] Peimbert & Torres-Peimbert (1976); [6] Pagel *et al.* (1978); [7] Peimbert *et al.* (2000); [8] Tsamis *et al.* (2003).

Na figura 30 estão representadas as regressões lineares ponderadas para a posição $0''$ e as regiões 11-18 obtidas para os dados de Peimbert *et al.* (2000). O intervalo de confiança foi escolhido para uma precisão de 95%. A barra horizontal em cada medida representa o tamanho da abertura adotado na extração e medição das linhas. Para o trabalho atual, este valor é constante, com aproximadamente $5''$, e justamente por ser constante, optou-se por não indicar na figura para não prejudicar o entendimento.

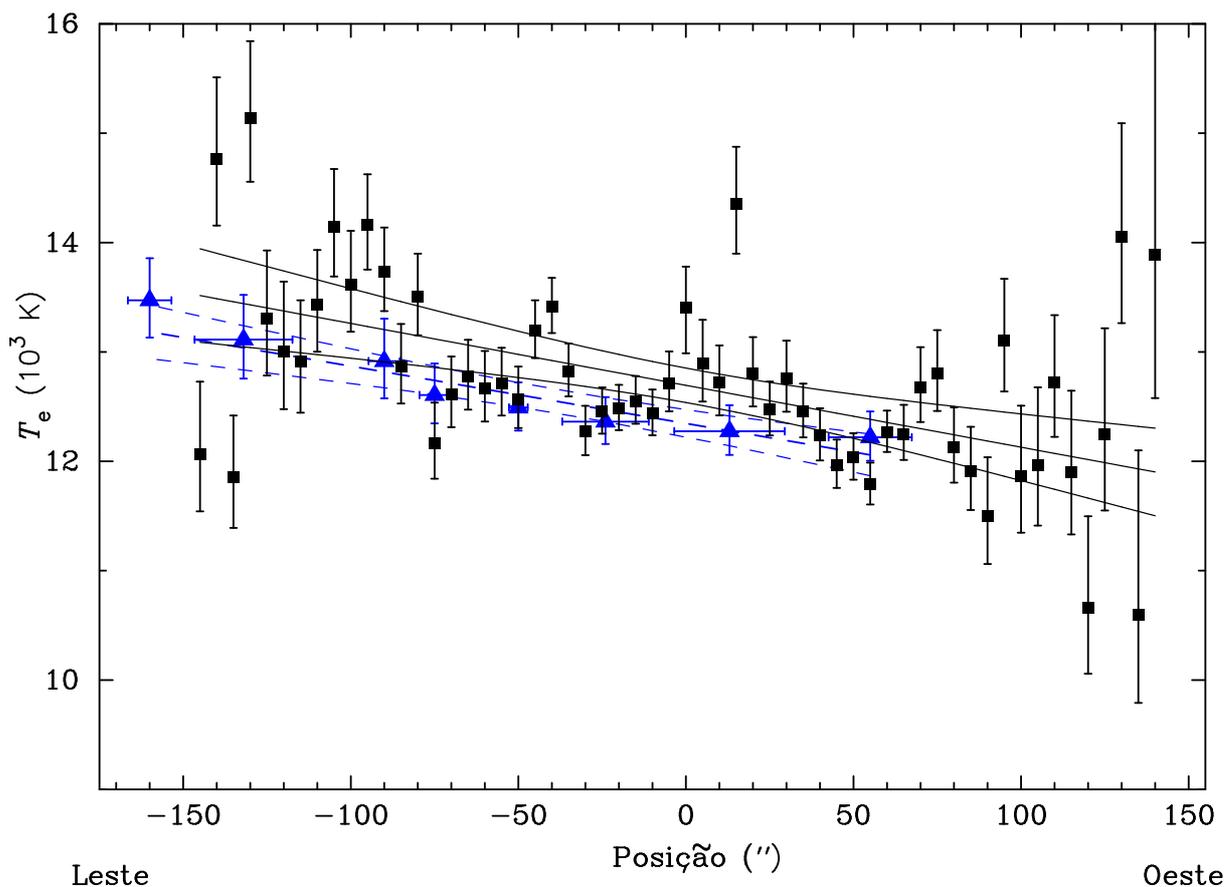


Figura 30 – Comparação entre os perfis de temperatura eletrônica e a regressão linear para a região H II NGC 346. Os pontos quadrados e as linhas em preto representam os valores obtidos para o presente trabalho. Os pontos triangulares e as linhas em azul os valores obtidos de Peimbert *et al.* (2000).

Nota-se, a partir da figura 30, que as temperaturas eletrônicas obtidas segundos os dados de Peimbert *et al.* (2000) são sistematicamente menores do que as estimadas no presente trabalho. Para confirmar que a hipótese de que esta fato, assim como o maior R^2 estimado para estes dados, é devido a maior abertura adotada pelos autores, degradou-se os dados estimados no presente trabalho, de tal forma a se ter o mesmo tamanho de abertura para ambos os dados. As novas temperaturas eletrônicas, estimadas

para o presente trabalho, quando comparadas com as de Peimbert *et al.* (2000), conforme indicado na tabela 9, indicam que a hipótese é coerente, visto que as diferenças encontradas estão dentro da escala de erro das medidas.

Tabela 9 – Comparação das temperaturas eletrônicas recalculadas com os dados de Peimbert *et al.* (2000) e os do trabalho atual degradadas

Posição	T_e^a (K)	T_e^b (K)
55	$12\,220_{-0.215}^{0.236}$	12 227
13	$12\,275_{-0.217}^{0.238}$	12 967
-24	$12\,363_{-0.205}^{0.224}$	12 484
-50	$12\,492_{-0.211}^{0.230}$	12 570
-75	$12\,606_{-0.259}^{0.288}$	12 760
-90	$12\,916_{-0.340}^{0.388}$	13 586
-132	$13\,113_{-0.357}^{0.408}$	13 354
-160	$13\,472_{-0.341}^{0.385}$	

^a referente à Peimbert *et al.* (2000);

^b referente ao trabalho atual.

4.1.2 Flutuações de temperatura eletrônica

Uma aproximação discreta para se estimar as flutuações de temperatura eletrônica (t^2) é dada pela equação 1.7. Porém as medidas realizadas ainda levam em consideração as flutuações devido apenas ao erro (t_{er}^2), que deve ser subtraído do calor estimado diretamente das medidas $t_s^2(\text{obs})$, resultando no t_s^2 procurado. Desta forma, para NGC 346, obteve-se uma flutuação de temperatura de $t_s^2(\text{obs}) = 0,00375$, o que representa uma dispersão de 6,1%, e uma flutuação corrigida de $t_s^2 = 0,0021$, ou equivalentemente, a uma dispersão de 4,5%, para a temperatura eletrônica via razão de linhas do [O III] nas 179 áreas. Resultados similares foram obtidos por Krabbe & Copetti (2002) encontrando $t_s^2 = 0,0025$ para 30 Doradus (NGC 2070), e por Krabbe & Copetti (2005) em estudo com 10 nebulosas planetárias Galácticas, obtendo t_s^2 variando de 0,0011 até 0,0050.

Utilizando a razão [O III] ($\lambda 4959 + \lambda 5007$)/ $\lambda 4363$ medida por Peimbert *et al.* (2000) para 13 seções sobre NGC 346 foram recalculadas as temperaturas eletrônicas com os mesmos dados atômicos utilizados neste trabalho, conforme indicado na tabela 8. Então, estimou-se a distribuição de flutuação de temperatura eletrônica em $t_s^2 = 0,00062$, apresentando um valor menor que o estimado no presente trabalho. A diferença encontrada pode ser explicada pelo tamanho das aberturas utilizadas por Peimbert *et al.* (2000) que foram 7 vezes maiores que as utilizadas neste estudo, além de estarem concentradas em uma área menor sobre NGC 346.

O cálculo de t_s^2 representa um limite inferior para t^2 , pois as medidas de temperatura são médias ao longo da linha de visada, com flutuações de temperatura em pequenas escalas aplainadas durante a observação. No entanto, t_s^2 é um estimador útil para t^2 , pois, teoricamente, não é esperado flutuações de temperatura em pequena escala (FERLAND, 2001), além da estrutura de temperatura eletrônica predita seguir um gradiente em grande escala. Liu (1998) menciona que a razão entre estes parâmetros deve ser menor que um fator de 2. Copetti (2006) utilizando simulações numéricas de observações ponto-a-ponto com diferentes sensores de temperatura eletrônica, temperaturas efetivas da estrela ionizante, densidade de hidrogênio, parâmetro de ionização e quantidade de aberturas (medidas ponto-a-ponto), encontrou $t_s^2/t^2 \approx 0,25$ para as temperaturas eletrônicas via razão de linhas do [O III] em regiões H II típicas.

Utilizando o modelo de Copetti (2006) e o valor de t_s^2 encontrado neste trabalho (0,0021), tem-se uma estimativa para $t^2([\text{O III}]) = 0,0082$, o que resulta em uma dispersão de temperaturas eletrônicas de cerca de 9,2% para NGC 346. Peimbert *et al.* (2000), comparando os valores médios de temperatura eletrônica estimados por diferentes métodos e zonas de ionização da nebulosa, calcularam $t^2 = 0,022$ para NGC 346, com um mínimo de $t^2 = 0,013$, ambos maiores que o valor estimado neste trabalho. Essa diferença pode estar associada ao modelo adotado em cada um dos estudos. Os valores estimados por Peimbert *et al.* (2000) e no trabalho atual são compatíveis com os preditos por modelos de fotoionização para objetos com características próximas às observadas em NGC 346, porém, esses não foram suficientes para explicar de forma satisfatória as discrepâncias observadas nos dados da literatura.

Tsamis *et al.* (2003) determinou a razão de abundância O^{++}/H^+ para NGC 346, via linhas de excitação colisional e recombinação, encontrando uma fator de discrepância de $ADF = 2,3$. Este fator é dado pela razão entre os valores de abundâncias estimadas segundo diferentes métodos, e então, procura-se um valor de $T_e([\text{O III}])$ que reproduza o valor de abundância química encontrada utilizando as linhas de recombinação, substituindo-o na equação 1.6 em T_0 encontra-se uma estimativa para t^2 . A flutuação de temperatura calculada desta forma representa o valor necessário para se explicar satisfatoriamente o problema da discrepância. Sendo assim, calculou-se para os dados indicados em Tsamis *et al.* (2003), um valor de t^2 igual a 0,09. Embora não se possa excluir a possibilidade de flutuações de temperatura em pequena escala espacial, pois esta ocorre em observações ponto-a-ponto, é pouco provável que seus valores sejam grandes o suficiente para resolver o problema das discrepâncias.

4.1.3 Mapa superficial de densidade eletrônica

A figura 31 (topo) apresenta uma imagem no filtro R de NGC 346, obtida com o *software* astronômico Aladin do *Centre de Données astronomiques de Strasbourg*, disponível em <http://aladin.u-strasbg.fr>. A ascensão reta (α) está representada no eixo horizontal, e no eixo vertical a posição adotada para a fenda em relação a estrela de referência em segundos de arco. A posição $0''$ indica o local da fenda sobre a estrela de referência de NGC 346. A região H II NGC 346 possui um tamanho angular maior que o da fenda utilizada neste trabalho, portanto a imagem foi cortada para mostrar apenas a seção observada do objeto, isto é, a região central mais brilhante que coincidiu com a zona mais densa do aglomerado estelar que compõe essa nebulosa gasosa, indicando que os dados obtidos se referem a seção do objeto de maior interesse para este trabalho.

A figura 31 (base) representa o mapa de densidade eletrônica, com escala de cor em cm^{-3} , obtido por meio do cálculo das densidades ponto-a-ponto da nebulosa. Embora existam pontos isolados de mais alta densidade, representados pelas regiões de cores mais claras, no geral não foi verificada uma grande variação nos valores de densidade eletrônica. O mapa apresenta valores de densidade eletrônica concentrados na região central do objeto, cuja intensidade de brilho em $H\alpha$ é maior. Porém, o mapa não apresenta, de forma nítida, nenhuma estrutura interna de NGC 346.

Utilizando o fluxo em $H\alpha$ como fator de peso estatístico foi possível estimar uma média ponderada para a densidade eletrônica de $54,18 \pm 7,36 \text{ cm}^{-3}$, com erro representado pelo desvio padrão ponderado, demonstrando a baixa densidade eletrônica calculada para NGC 346. A dispersão estimada para a densidade foi de apenas 13,5% da média ponderada, indicando uma certa homogeneidade.

Os pontos escuros do mapa representam as posições sobre a nebulosa nas quais não foi possível estimar a densidade eletrônica. Nesses pontos a razão de linhas de [S II] resultou em valores fora do limite superior onde a aproximação de átomos de 5 níveis é válida, assim, a densidade eletrônica é virtualmente nula.

4.2 Perfil Espacial de densidade eletrônica em 18 Regiões H II nas Nuvens de Magalhães

A densidade eletrônica foi estimada utilizando como sensor as razões de linha do [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$ em medidas ponto-a-ponto sobre 18 regiões H II presentes nas Nuvens de Magalhães, sendo 11 na GNM e 7 na PNM. Para cada nebulosa se realizou um estudo estatístico dos resultados encontrados, construiu-se perfis espaciais de fluxo em $H\alpha$, razão

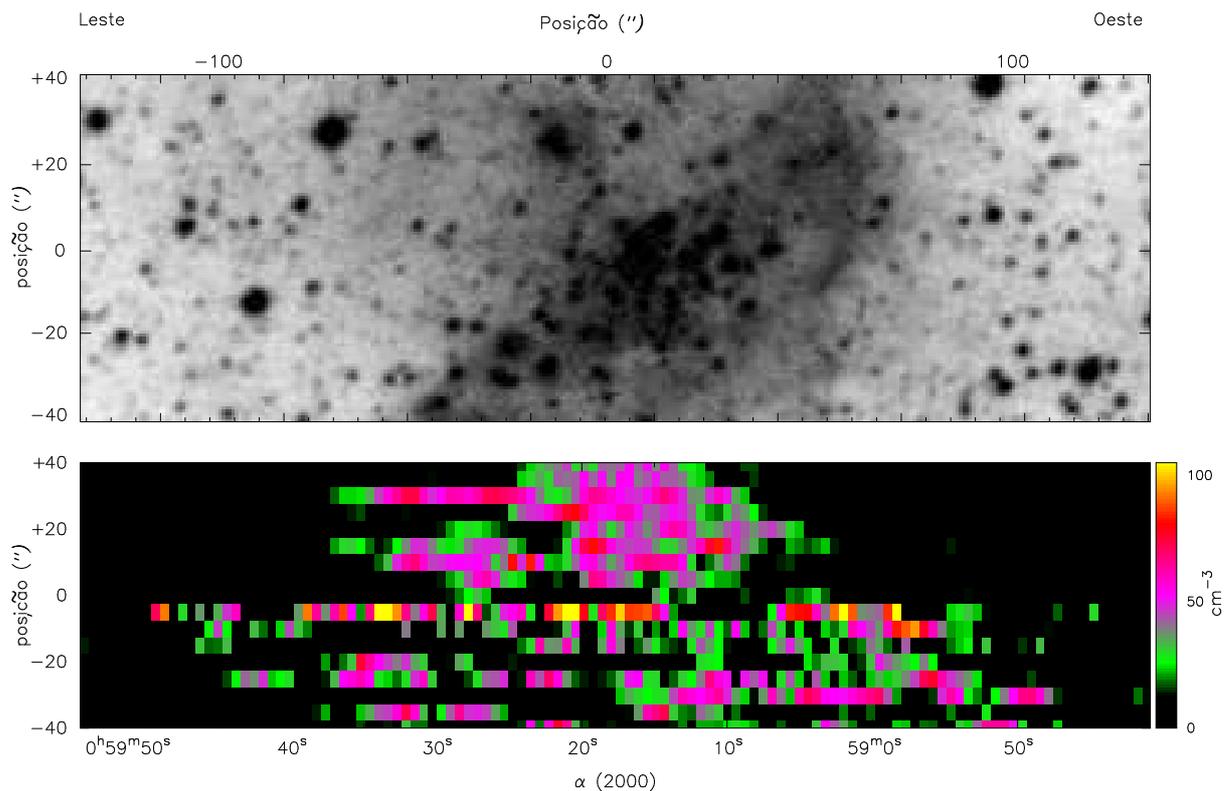


Figura 31 – Imagem na banda R , número 029, obtida do *Digitalized Sky Survey 2* (DSS2) e observada pelo programa do *Anglo-Australian Observatory* (AAO) cortada para reproduzir apenas a seção observada (topo); mapa de densidade eletrônica superficial para a Região H II NGC 346 (base). A direção Norte aponta para a parte superior e a direção Leste para a esquerda da imagem. O eixo horizontal representa a ascensão reta e o eixo vertical a posição da fenda sobre a nebulosa em relação a estrela adotada com referência, em segundos de arco. Para o mapa os píxeis foram alongados na direção vertical, de $1,5''$ para $5''$.

de linhas do $[S II]$ e de densidade eletrônica, assim como a comparação com resultados disponíveis na literatura. Optou-se pela utilização de um critério de seleção para demarcar nos perfis, as posições que realmente se encontram sobre a nebulosa. Em especial nas nebulosas de dimensões menores que o tamanho da fenda no plano do céu. De tal forma, definiu-se que o fim da região H II ocorre quando o fluxo em $H\alpha$ cai para 0,1% do valor de pico.

As medidas de $H\alpha$ estão indicadas no perfil, porém, optou-se por não apresentar as barras de erro por serem insignificantes em relação aos valores medidos. Assim como já realizado para os perfis em $H\beta$, aqui também foi utilizada uma interpolação com a função spline cúbica, visando suavizar as ligações entre os pontos, para cada posição de fenda observada.

4.2.1 Análise estatística da densidade eletrônica

Partindo da formulação geral de uma análise de quartis, realizou-se um estudo dos dados de razão R (Tabela 10) de linhas do [S II] $\lambda 6716/\lambda 6731$ e densidade eletrônica N_e (Tabela 11), ambos organizados segundo o padrão adotado neste trabalho. A média indicada na tabela é ponderada, o peso estatístico utilizado foi o fluxo em $H\alpha$.

De forma geral, todas as nebulosas estudadas apresentaram uma mediana de densidade eletrônica baixa. Os valores encontrados foram menores que 100 cm^{-3} para a maioria dos objetos, sendo menores que 10 cm^{-3} , ou virtualmente nulos, para as regiões HII mais compactas da amostra. A grande variação nos valores de densidade eletrônica nos objetos é evidenciada no intervalo inter-quartis, região representativa de 50% das medidas de densidade em cada nebulosa, que apresenta alta dispersão da mediana, chegando a mais de 100% para as maiores nebulosas em tamanho angular. Para a estatística das nebulosas de pequenas dimensões, foram utilizadas apenas os dados correspondentes às seções que continham fluxo em $H\alpha > 0.1\%$, conforme o critério de seleção.

Para comparação dos resultados da densidade apresentados no presente trabalho com os resultados observados em literatura, optou-se por recalcular as densidades eletrônicas utilizando a razão de linha medida pelos diversos autores e os parâmetros atômicos utilizados no trabalho atual (Tabela 12), visando minimizar os erros nos valores ocasionados pelo método e parâmetros atômicos.

Os perfis de 30 Doradus apresentam um pico de densidade eletrônica alinhado com a seção de maior brilho superficial da nebulosa, ou em alguns casos, com um ligeiro deslocamento entre eles. Apesar deste objeto possuir uma distribuição de densidade não-homogênea ao longo da fenda, todos os perfis apresentaram flutuações nos valores de densidade eletrônica estimados, com maior valor de densidade em $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 5''$ S, tendo a maior variação entre a mediana e o valor de pico em $PA = 106^\circ$, um fator de aproximadamente 17 vezes. A mediana da densidade eletrônica para todas as posições medidas sobre 30 Doradus foi de 133 cm^{-3} , com total de 1 525 medidas, e um valor de pico de $N_e = 944_{-388}^{+700} \text{ cm}^{-3}$. A média ponderada em fluxo apresenta um valor aproximadamente igual (173 cm^{-3}) a mediana estimada, indicando uma certa homogeneidade dos dados como um todo. Os perfis para $PA = 10^\circ$ (Figura 32), 26° (Figura 34), 106° (Figura 35) e 90° – posição $0''$ (Figura 42) apresentam uma queda abrupta de densidade eletrônica em uma direção específica. Esta queda indica um efeito dinâmico sobre a nebulosa, isto é, quando o gás ionizado é freado em sua expansão, pela existência de uma nuvem molecular por exemplo, ocorre um variação brusca de densidade eletrônica. Quando esta variação ocorre no interior da nebulosa, como é o caso em 30 Doradus, tem-se o acúmulo de matéria ionizada, formando estruturas dinâmicas, tais como os arcos observados neste objeto.

Tabela 10 – Resumo da estatística para a razão de linhas do [S II] para as 18 nebulosas observadas

Objeto	PA	N	razão [S II]				Média
			Q1	Mediana	Q3	Min.	
GNM							
30 Doradus	Σ	1525	1,241	1,303	1,370	0,891 \pm 0,130	1,372
N4 A	14	40	1,237	1,342	1,439	1,022 \pm 0,108	1,063
N11 B	90	123	1,346	1,384	1,414	1,145 \pm 0,018	1,352
N11 C	90	100	1,316	1,382	1,453	1,024 \pm 0,159	1,372
N11 E	90	66	1,286	1,341	1,414	1,113 \pm 0,030	1,294
N11 F	90	126	1,396	1,473	1,551	1,215 \pm 0,294	1,462
N11 G	90	100	1,437	1,546	1,672	1,302 \pm 0,159	1,498
N11 I	90	97	1,377	1,444	1,546	1,246 \pm 0,127	1,449
N11 K	90	38	1,460	1,541	1,642	1,393 \pm 0,035	1,437
N44 D	90	81	1,345	1,403	1,437	1,218 \pm 0,098	1,443
N160 A	Σ	141	1,320	1,369	1,407	0,915 \pm 0,014	1,132
PNM							
N13	90	20	1,260	1,343	1,416	1,140 \pm 0,066	1,323
N63	90	22	1,437	1,519	1,629	1,313 \pm 0,029	1,369
N77 A	90	39	1,443	1,491	1,623	1,205 \pm 0,006	1,359
N81	106	36	0,983	1,205	1,426	0,837 \pm 0,085	1,027
N83 A/C	Σ	100	1,315	1,419	1,485	1,165 \pm 0,005	1,401
N88	Σ	57	1,261	1,422	1,482	0,792 \pm 0,012	1,410
NGC 346	Σ	2035	1,360	1,406	1,441	1,282 \pm 0,066	1,378

Σ : valor referente a soma de todas as aberturas deste objeto;

N: quantidade de espectros unidimensionais utilizados nas medidas ponto-a-ponto;

Q1: primeiro quartil (limite dos 25% menores valores da amostra);

Q3: terceiro quartil (limite dos 75% menores valores da amostra).

Tabela 11 – Resumo da estatística para a densidade eletrônica para as 18 nebulosas observadas

Objeto	PA	N	N_e (cm ⁻³)				Média
			Q1	Mediana	Q3	Max.	
GNM							
30 Doradus	Σ	1525	74	133	201	944^{+700}_{-388}	173
N4 A	14	40	76	111	265	553^{+307}_{-209}	195
N11 B	90	123	30	49	81	319^{+29}_{-26}	80
N11 C	90	100	42	73	125	368^{+185}_{-138}	63
N11 E	90	66	27	82	143	372^{+54}_{-49}	82
N11 F	90	126	< 10	< 10	32	219^{+106}_{-90}	26
N11 G	90	100	< 10	< 10	37	118^{+204}_{-118}	21
N11 I	90	97	< 10	< 10	36	116^{+52}_{-45}	20
N11 K	90	38	< 10	< 10	< 10	28^{+27}_{-25}	< 10
N44 D	90	81	< 10	33	75	133^{+105}_{-84}	59
N160 A	Σ	141	38	69	181	856^{+50}_{-46}	388
PNM							
N13	90	20	< 10	18	59	95^{+13}_{-12}	53
N63	90	22	20	41	64	107^{+74}_{-87}	54
N77 A	90	39	< 10	< 10	17	233^{+8}_{-7}	72
N81	106	36	< 10	232	650	1181^{+540}_{-348}	528
N83 A/C	Σ	100	< 10	61	125	289^{+7}_{-7}	83
N88	Σ	57	< 10	35	278	1434^{+79}_{-73}	358
NGC 346	Σ	2035	< 10	< 10	26	140^{+78}_{-67}	54

Σ : valor referente a soma de todas as aberturas deste objeto;

N: quantidade de espectros unidimensionais utilizados nas medidas ponto-a-ponto;

Q1: primeiro quartil (limite dos 25% menores valores da amostra);

Q3: terceiro quartil (limite dos 75% menores valores da amostra).

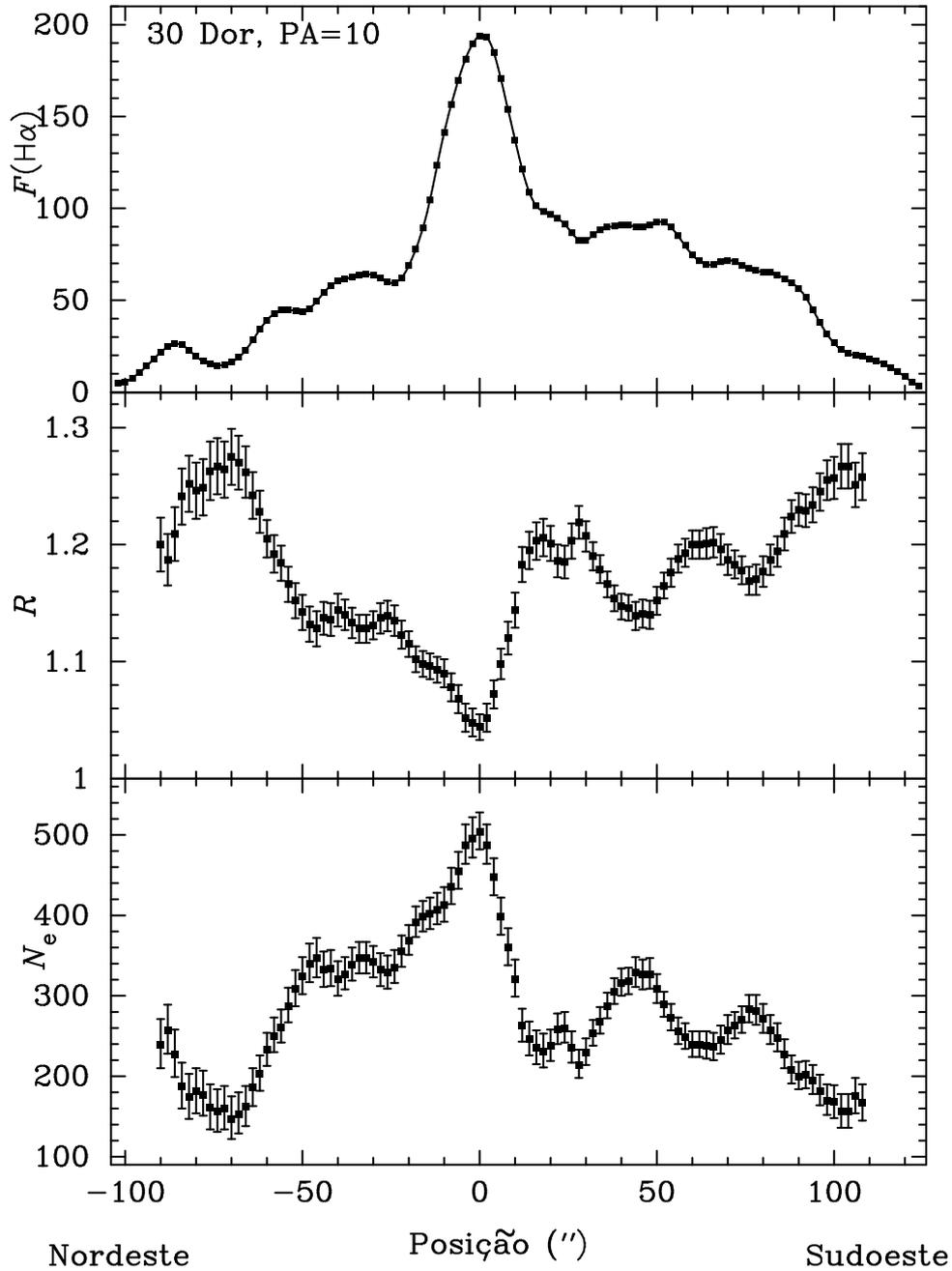


Figura 32 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 10^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

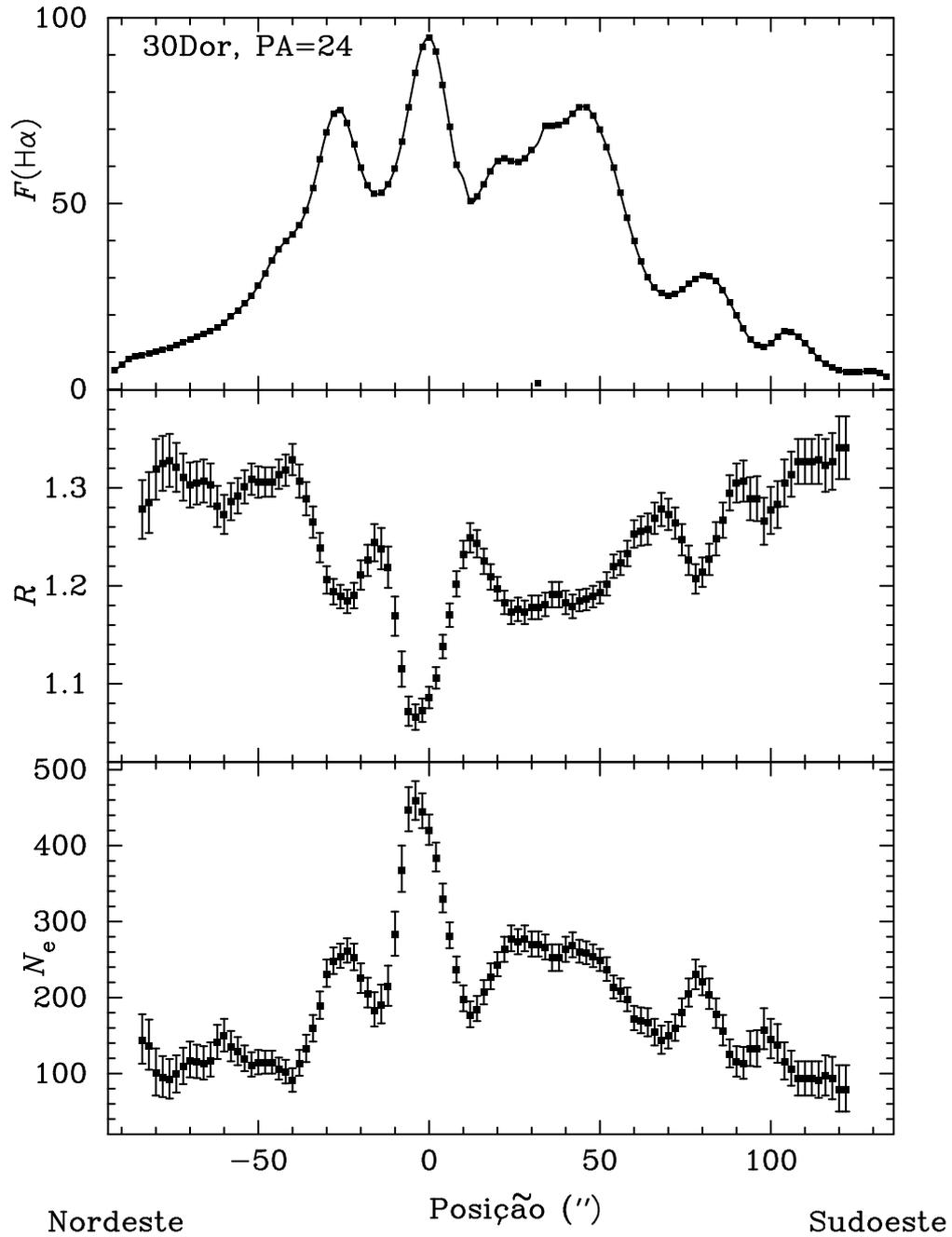


Figura 33 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 24^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

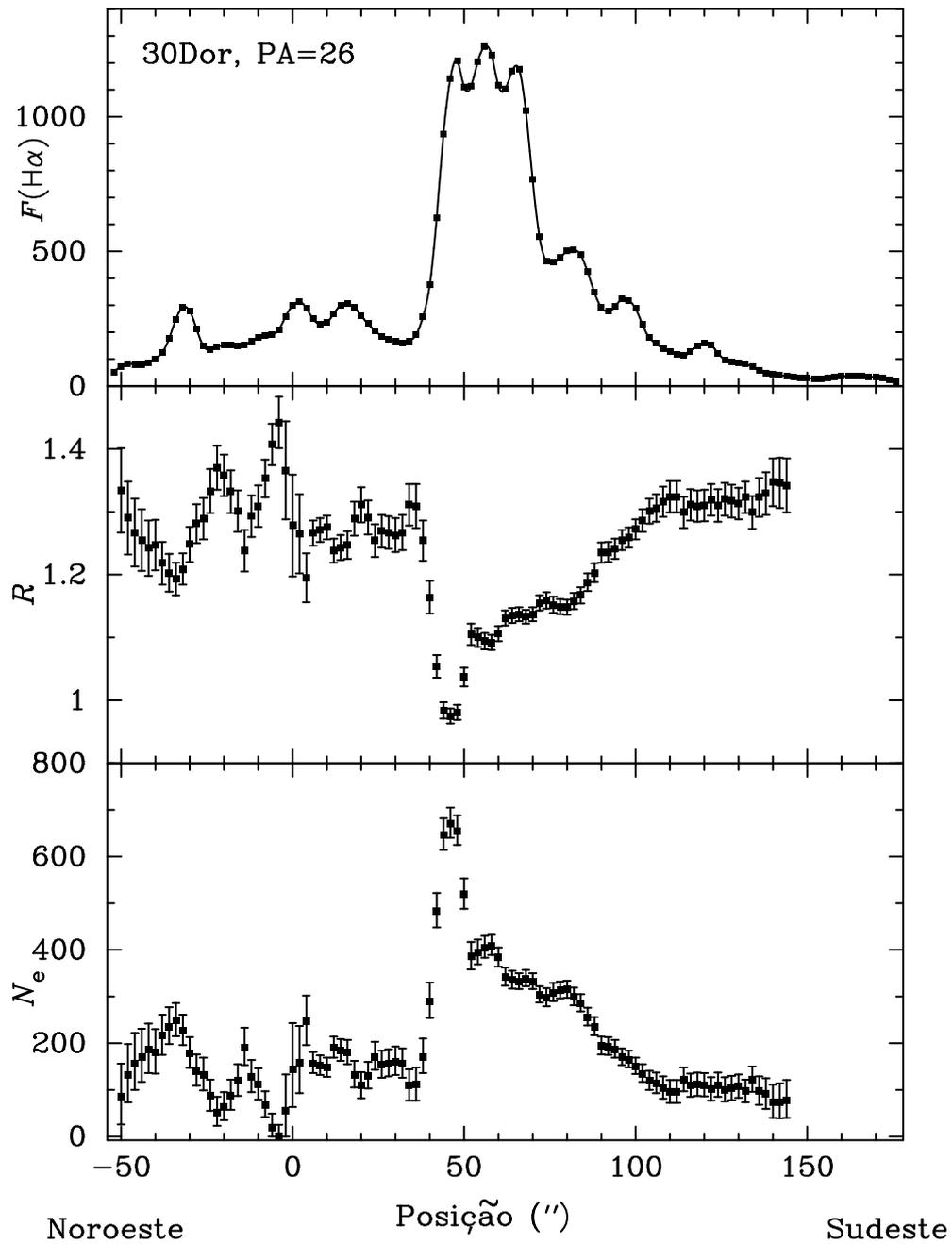


Figura 34 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^3 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 26^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

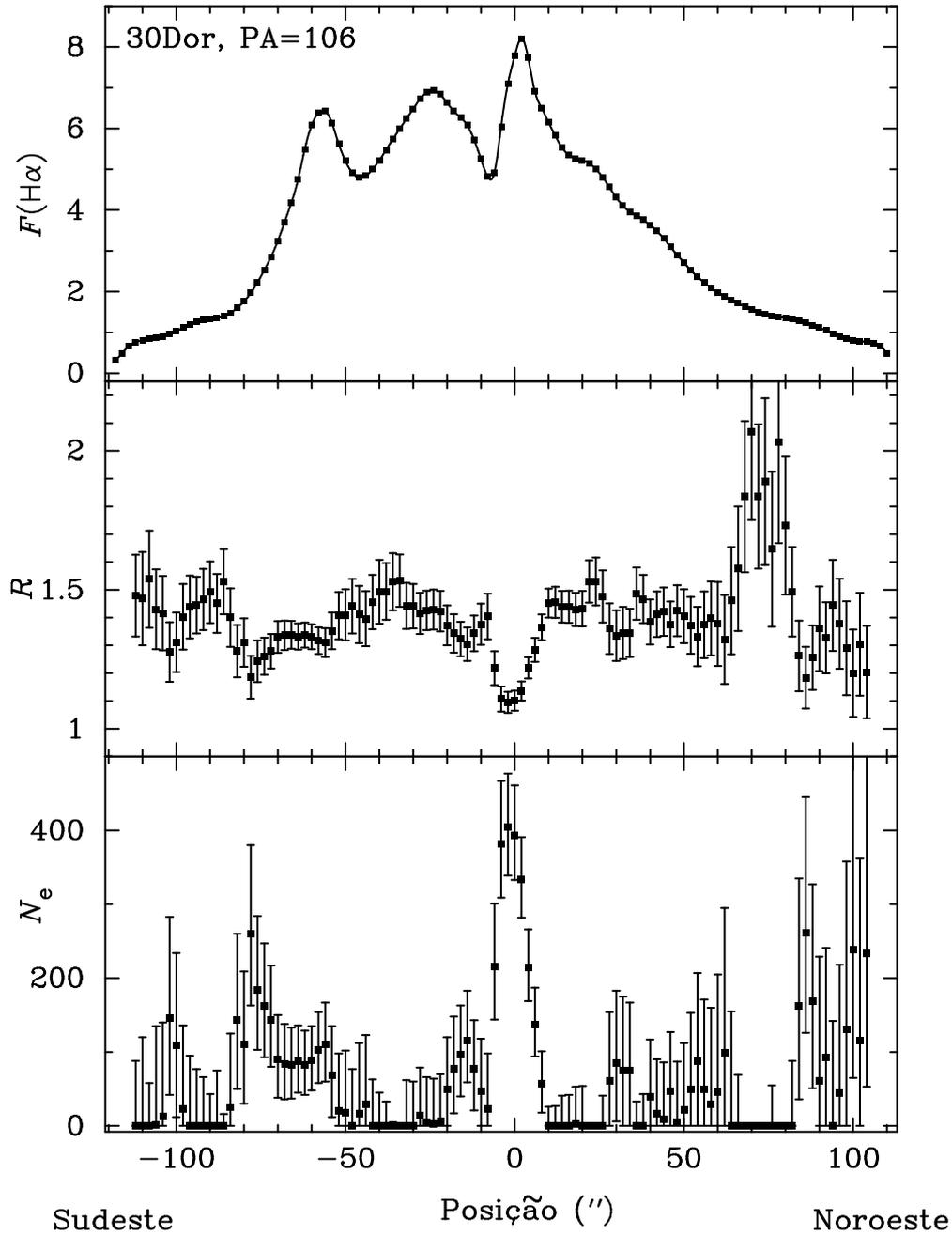


Figura 35 – Perfil espacial do fluxo em H α (10^3 contagens), da razão de linhas de [S II] $\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de PA = 106° . As posições são relativas ao centro da fenda.

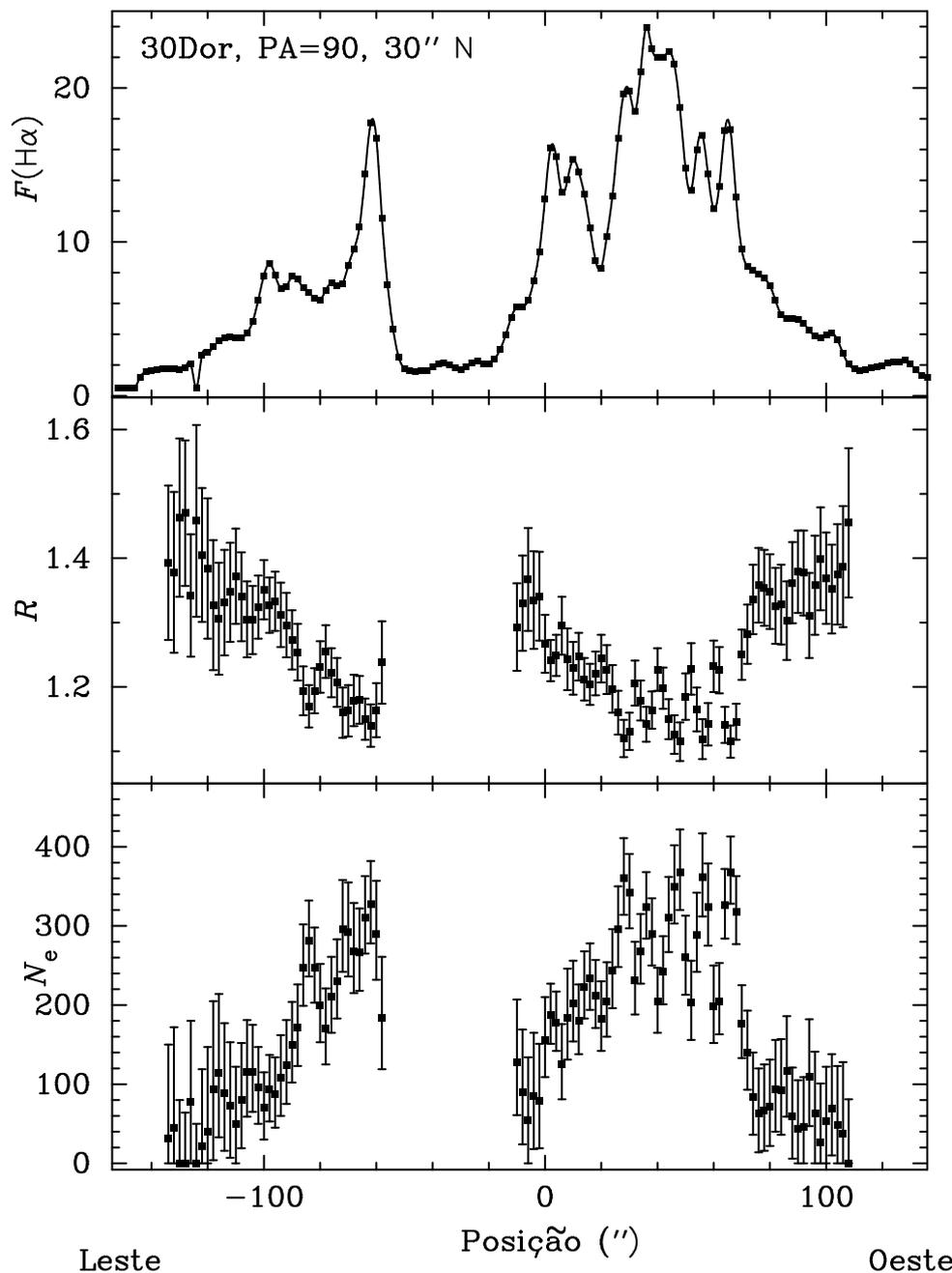


Figura 37 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-13} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 30''$ N. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

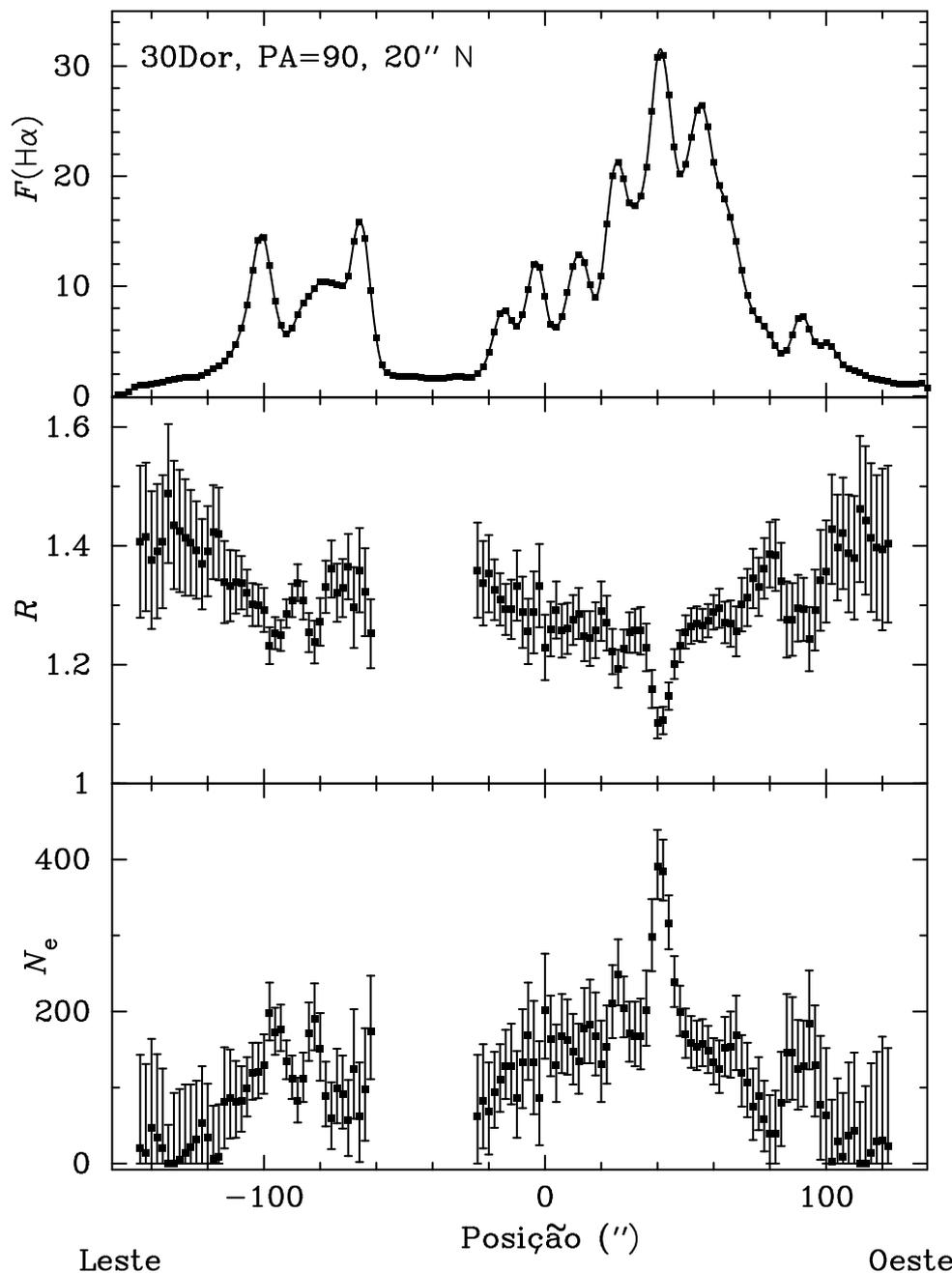


Figura 38 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-13} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 20''$ N. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

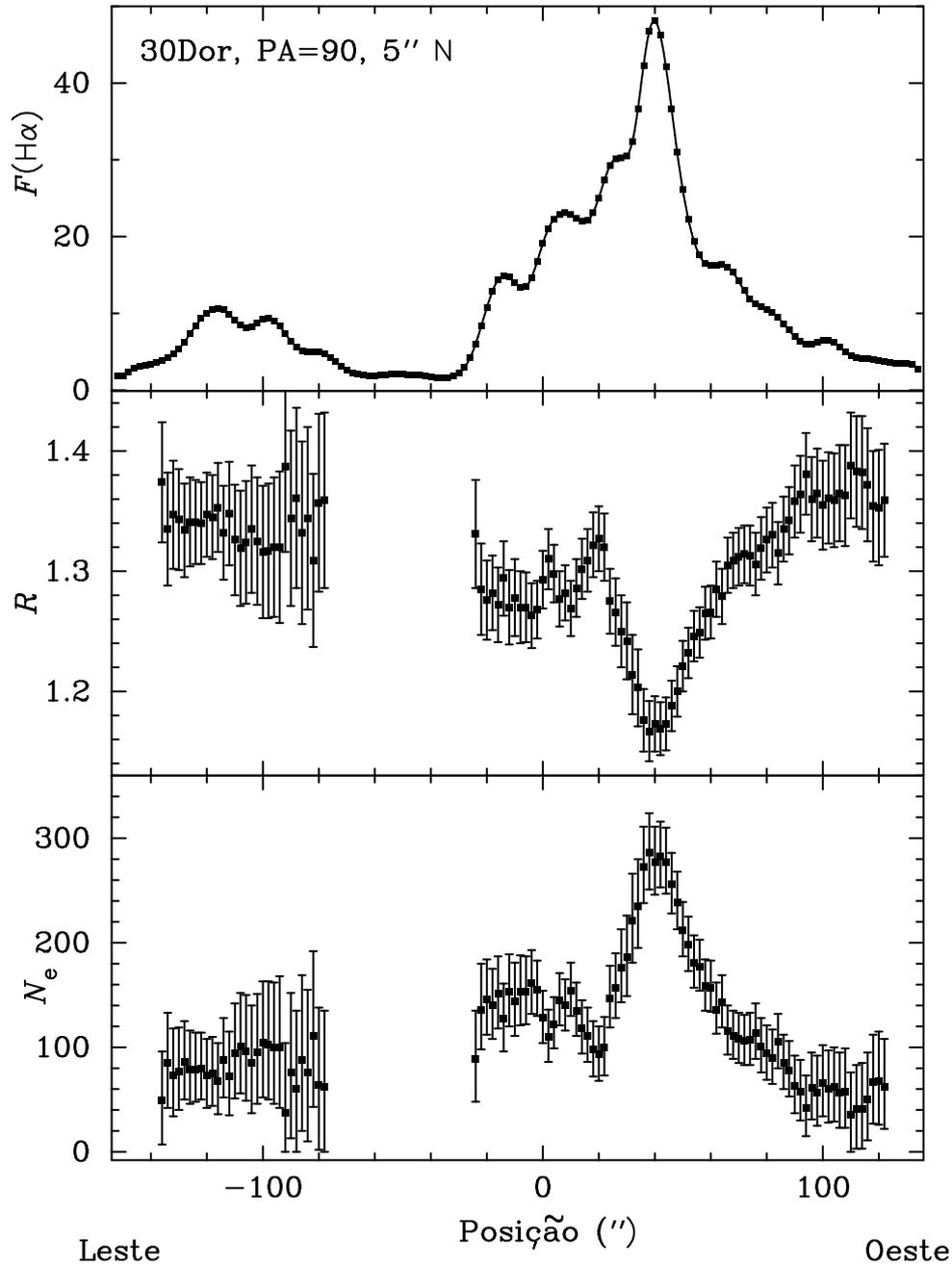


Figura 41 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-13} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 5''$ N. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

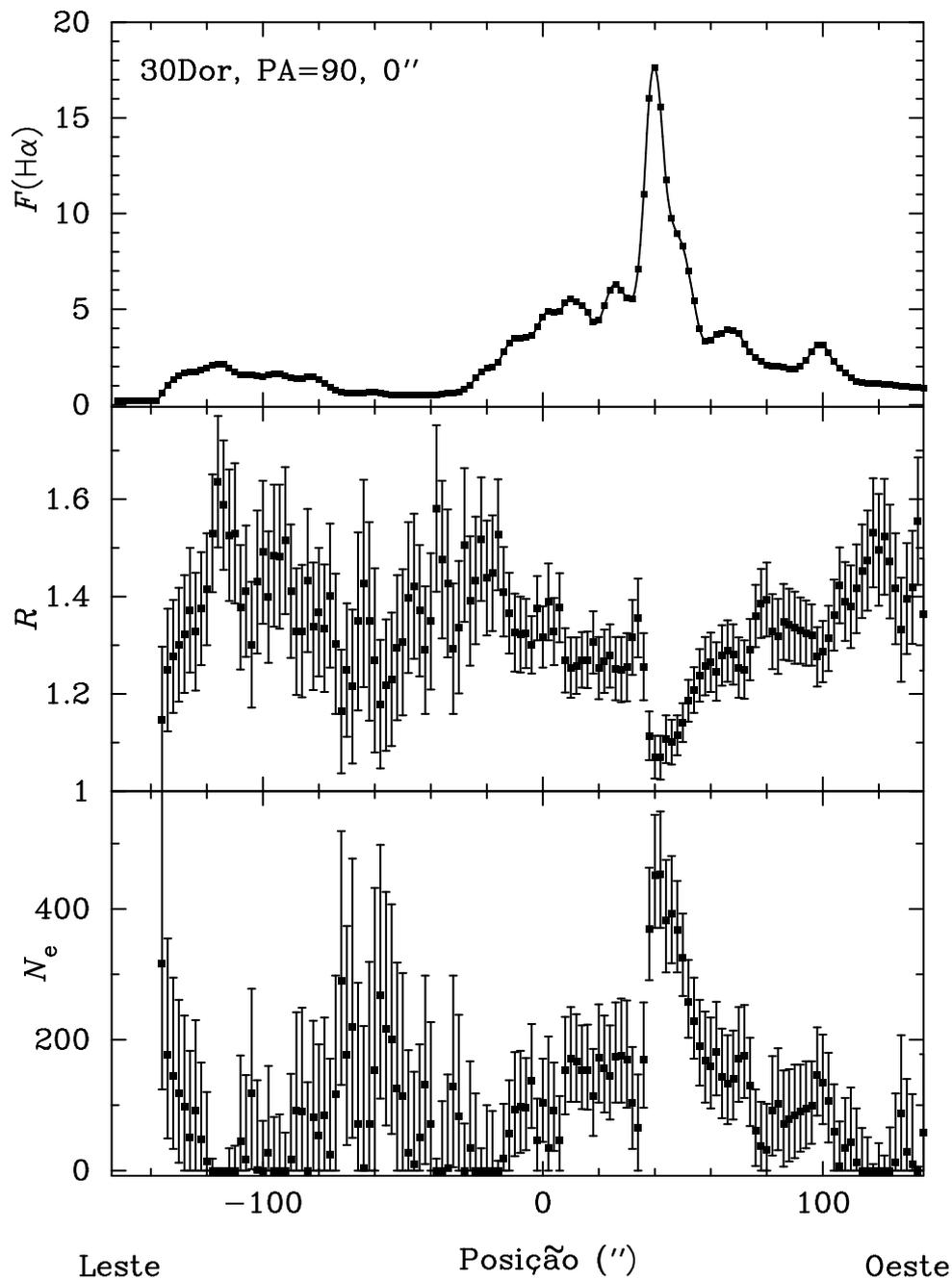


Figura 42 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ ($10^{-13} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 0''$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

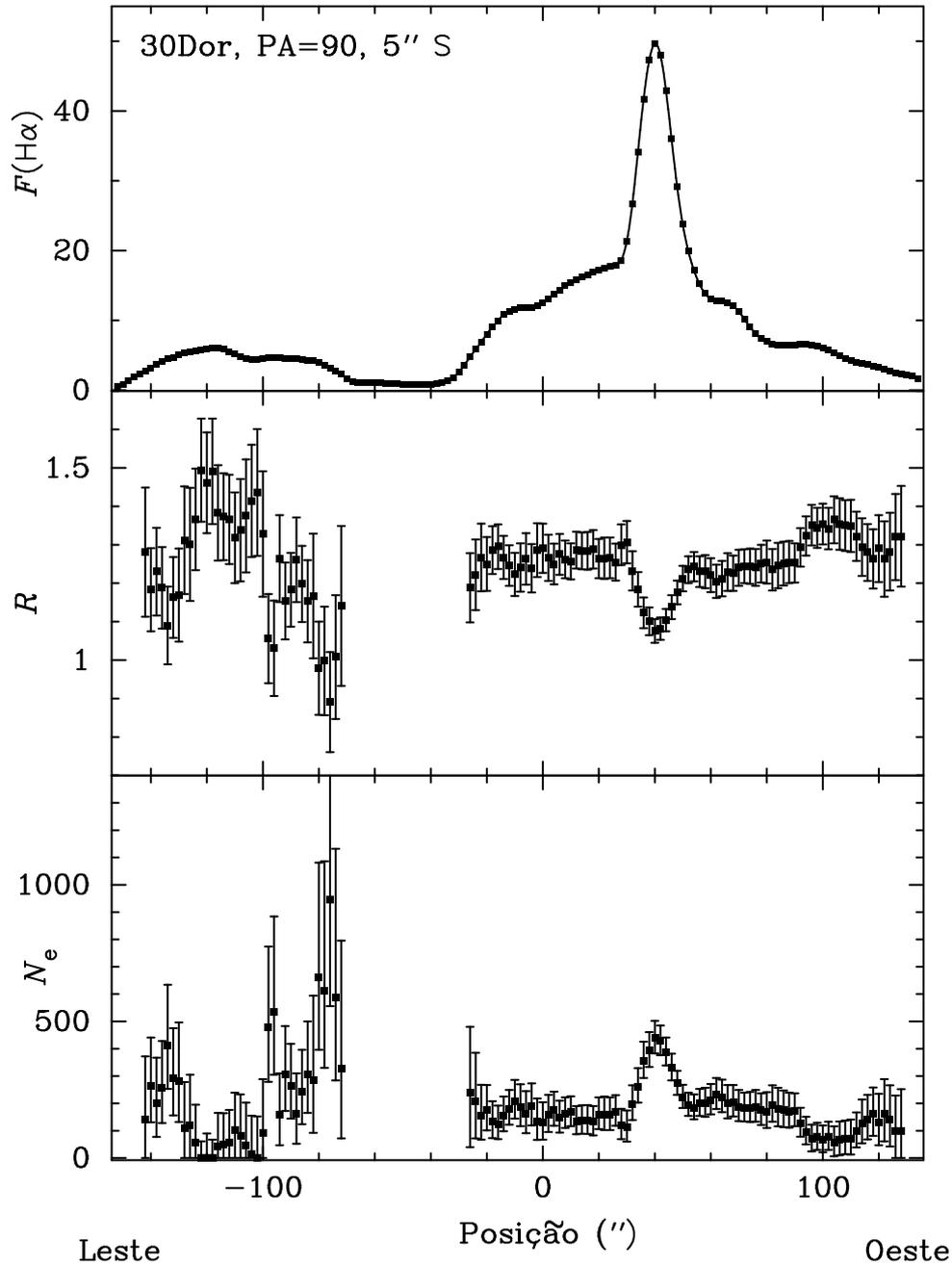


Figura 43 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-13} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 5''$ S. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

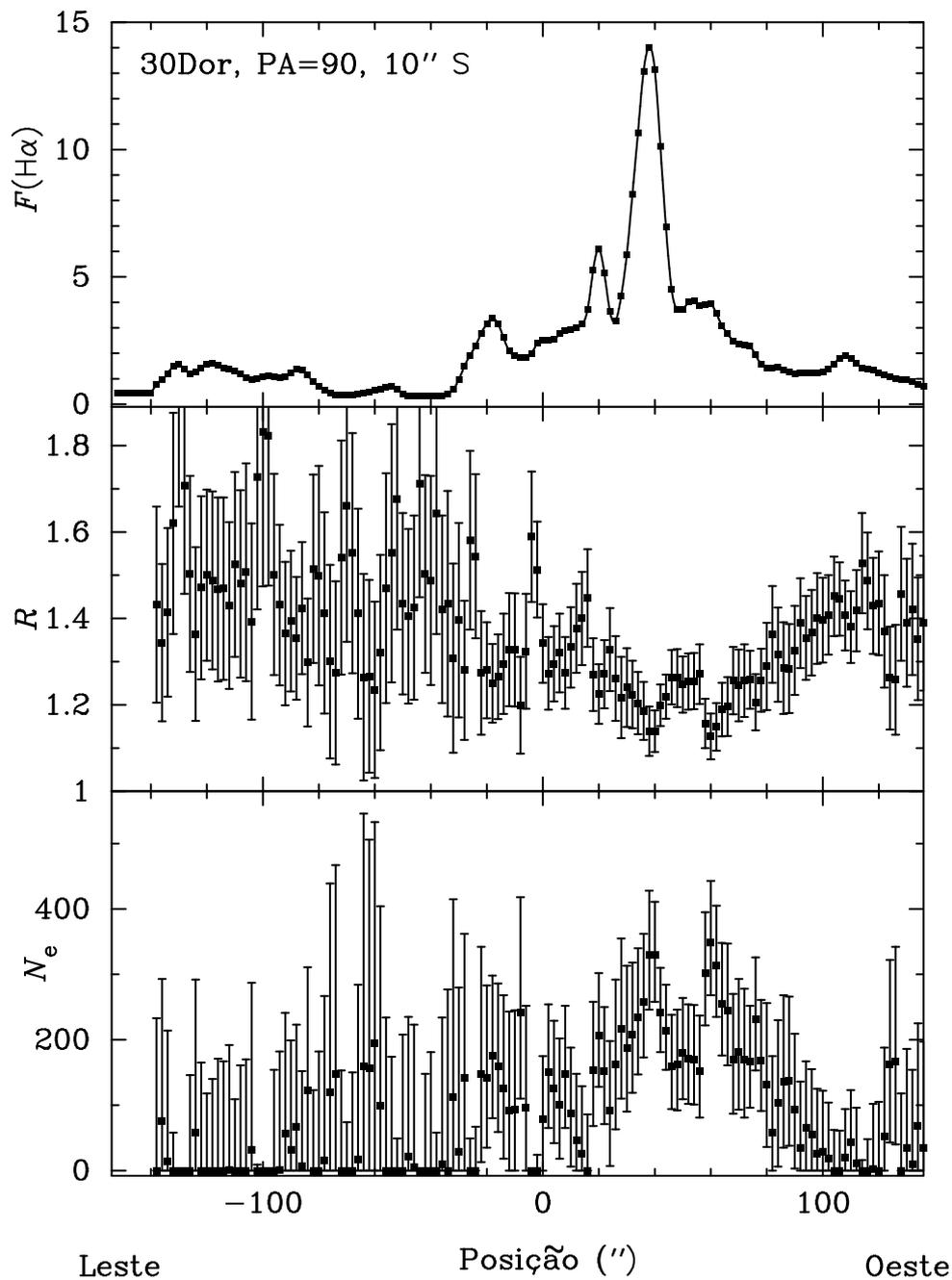


Figura 44 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-13} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em 30 Doradus com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 10''$ S. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

30 Doradus foi observado por Peimbert & Torres-Peimbert (1974) em três posições, porém nenhuma coincidiu com as posições adotadas para o trabalho atual. As medidas da razão de linha do [S II] são integradas em todo o espectro, e as densidades eletrônicas recalculadas se encontram entre os valor do $Q3$ e o máximo estimado para este trabalho. Isto porque os autores escolheram as regiões mais brilhantes sobre a nebulosa para realizar as medidas, dando preferência à região central e as estruturas em forma de arco observadas na imagem em $H\alpha$ de 30 Doradus. Por outro lado, Vermeij *et al.* (2002 a,b) optaram por observar fora das regiões de maior brilho superficial, dessa forma as seções 1,2 e 4, se encontram mais ao Norte que todas as observações realizadas para o presente trabalho, e a seção 3 mais ao Sul. Os valores recalculados de densidade eletrônica são próximos ao $Q3$ e à media ponderada estimados pela estatística de densidade deste trabalho. Tsamis *et al.* (2003) observaram em uma posição equivalente a $\Delta\delta = 30$ N, também com alinhamento Leste-Oeste. A densidade integrada recalculada foi aproximadamente o valor de pico estimado para esta posição, com uma diferença menor que a estimativa de erro das medidas, e pouco maior que o $Q3$ de toda as medidas.

Para GNM: N4 A, o perfil apresenta um pico de densidade ligeiramente deslocado para Nordeste em relação à seção mais brilhante na nebulosa (Figura 45). Este objeto, apresenta uma distribuição de densidade eletrônica sem forma definida ao longo da fenda, porém apresenta um pico de $553_{-209}^{+307} \text{ cm}^{-3}$. A seção mais brilhante da região HII GNM: N4 A foi observada por Peimbert & Torres-Peimbert (1974), a densidade eletrônica integrada recalculada foi de 182 cm^{-3} (Tabela 12), estando entre o valor da mediana e da média ponderada estimada para este objeto no presente trabalho. Heydari-Malayeri & Lecavelier des Etangs (1994) realizaram um estudo detalhado desta nebulosa. Estes apresentaram uma razão de linha do [S II] integrada para toda a nebulosa, resultando em uma densidade eletrônica recalculada de 154 cm^{-3} , aproximadamente igual a mediana. Vermeij *et al.* (2002 a,b) utilizando uma fenda com alinhamento em $PA = -53,3$ obtiveram uma razão de linhas integrada, da qual foi estimada a densidade eletrônica recalculada de 102 cm^{-3} . Este valor é ligeiramente menor que a mediana calculada neste trabalho.

No geral, as densidades eletrônicas estimadas para os componentes estudados do Complexo GNM: N11 resultaram em valores baixos, apresentando uma mediana inferior a 100 cm^{-3} , a média ponderada seguiu a mesma tendência. Para a maioria das nebulosas deste complexo, observou-se uma flutuação estatística em torno da mediana de densidade, exceto em GNM: N11 B e GNM: N11 E que apresentaram uma estrutura na distribuição de densidade eletrônica.

GNM: N11 B (Figura 46) apresenta um forte pico de densidade alinhado com o pico de fluxo $H\alpha$, e uma queda abrupta de densidade na direção Oeste. Assim como em 30 Doradus, aqui a variação brusca de densidade se encontra no meio da nebulosidade, indicando

a existência de alguma estrutura dinâmica em seu interior. Dufour (1975) obteve medidas integradas sobre GNM: N11 B, centrada na seção de maior brilho superficial. A densidade eletrônica recalculada foi de 19 cm^{-3} (Tabela 12), que é menor que o $Q1$ calculado neste trabalho. A ausência de um valor elevado, como o de pico estimado no trabalho atual, pode ser explicado pelo menor tamanho de fenda utilizada pelo autor. Pagel *et al.* (1978) observaram em uma posição próxima a de Dufour (1975), obtendo valor de densidade recalculado pouco maior que $Q3$ estimado no trabalho atual. Possivelmente os autores observaram sobre uma seção de alta densidade. Tsamis *et al.* (2003) utilizaram uma fenda longa centrada na seção mais brilhante do objeto com alinhamento $PA = -57^\circ$, obtendo valor integrado de densidade eletrônica recalculado de 70 cm^{-3} , pouco menor do que a média ponderada estimada no trabalho atual.

A região H II GNM: N11 C (Figura 47) apresenta um perfil de densidade aproximadamente plano, com intensas flutuações estatística em torno da média. Heydari-Malayeri *et al.* (1987) mediram a razão de linha do [S II] em 143 pontos sobre GNM: N11 C, apresentando uma mediana das razões de linha sobre todos os pontos, resultando em uma densidade eletrônica recalculada (149 cm^{-3} , Tabela 12), ligeiramente maior do que o $Q3$ estimado no presente trabalho.

Por outro lado, o perfil de GNM: N11 E (Figura 48) apresenta um pico de densidade eletrônica ligeiramente deslocado da seção mais brilhante da nebulosidade e uma queda abrupta de densidade na direção Oeste, indicando a existência de alguma estrutura interna à nebulosidade que está freando o movimento do gás ionizado, condensando matéria neste local. Heydari-Malayeri *et al.* (1987) também observaram essa nebulosa, em 84 medidas ponto-a-ponto, apresentando a mediana das razões de linha do [S II]. A densidade eletrônica recalculada (215 cm^{-3} , Tabela 12), é pouco maior que o $Q3$ estimado para esta nebulosidade no trabalho atual.

As regiões de menor brilho superficial do Complexo N11, as regiões H II GNM: N11 F–K (Figura 49 – 52) não apresentaram qualquer estrutura relevante em seus perfis, apenas flutuações em torno da média na distribuição de densidade eletrônica.

GNM: N44 D apresentou baixos valores de densidade eletrônica com um fraco pico ligeiramente deslocado para Leste com a região mais brilhante em $H\alpha$ da nebulosa (Figura 53). Este deslocamento indica um diferença de posição, possivelmente devido à expansão da matéria ionizada, entre as diversas zonas de ionização, sugerindo uma estrutura multicamadas de ionização para este objeto.

Para GNM: N160 A os perfis apresentam um forte pico de densidade perfeitamente alinhado com o pico de fluxo em $H\alpha$ (Figuras 54 e 55). Os valores máximos de densidade eletrônica estimados foram de 856 cm^{-3} para $PA = 38^\circ$ e 647 cm^{-3} para $PA = 72^\circ$,

sendo as medianas virtualmente iguais entre si (48 e 58 cm^{-3}). A média ponderada sobre todas as posições observadas foi um dos valores mais elevados estimados, e o maior para os objetos estudados na GNM (388 cm^{-3}). Dos dados de Dufour (1975) para GNM: N160 A foi possível recalculer a densidade eletrônica integrada de $N_e = 152 \text{ cm}^{-3}$ (Tabela 12), aproximadamente o mesmo o valor do terceiro quartil do trabalho atual. Heydari-Malayeri & Testor (1986) observaram em três seções diferentes sobre a nebulosa, numerada em ordem decrescente de intensidade de brilho em $\text{H}\alpha$, da maior para a menor. As densidades recalculadas foram 1 400, 554 e 278 cm^{-3} (Tabela 12), para as seções A1, A2 e A3, respectivamente. Este objeto apresentou em seu perfil espacial um alinhamento entre os picos de densidade e fluxo em $\text{H}\alpha$, o que explica o valor elevado para a seção A1 (região mais intensa da nebulosa). Os valores recalculados se encontram em torno da média ponderada calculada para o trabalho atual, exceto da seção A1 que está além deste máximo. Vermeij *et al.* (2002 a,b) observaram em duas regiões distintas de GNM: N160 A, equivalendo as seções A1 e A2 de Heydari-Malayeri & Testor (1986). As densidades recalculadas foram de 168 cm^{-3} (região A1) e 166 cm^{-3} (região A2), ambas apresentados na tabela 12. Estes valores são ligeiramente menores Q_3 estimado no presente trabalho. Os menores valores estimados para esse último trabalho podem ser explicados pelo método de medidas integradas sobre toda a fenda, isto é, Heydari-Malayeri & Testor (1986) e Vermeij *et al.* (2002 a,b) observaram as mesmas seções sobre a nebulosa, porém os últimos integraram em uma área maior, com o uso de uma fenda longa, suavizando as variações de densidade.

O objeto PNM: N13 é uma região H II de tamanho angular extremamente reduzido e de alto brilho superficial, como pode ser observado no perfil de brilho em $\text{H}\alpha$ (Figura 56). Sua distribuição de densidade eletrônica apresenta dois picos suaves, cujos valores são aproximadamente 100 cm^{-3} . O pico mais a Leste se encontra alinhado com o pico de brilho da nebulosa, o a Oeste está alinhado com um máximo local no brilho em $\text{H}\alpha$. Pagel *et al.* (1978) mediram uma razão de linhas do $[\text{S II}]$ integrada em toda a fenda, centrada em PNM: N13 na direção Leste-Oeste. A densidade eletrônica recalculada foi de 237 cm^{-3} (Tabela 12). Este valor é o dobro do valor máximo estimadas ponto-a-ponto no presente trabalho. Isso ocorre porque provavelmente os autores observaram em uma região mais brilhante do que a observada no trabalho atual.

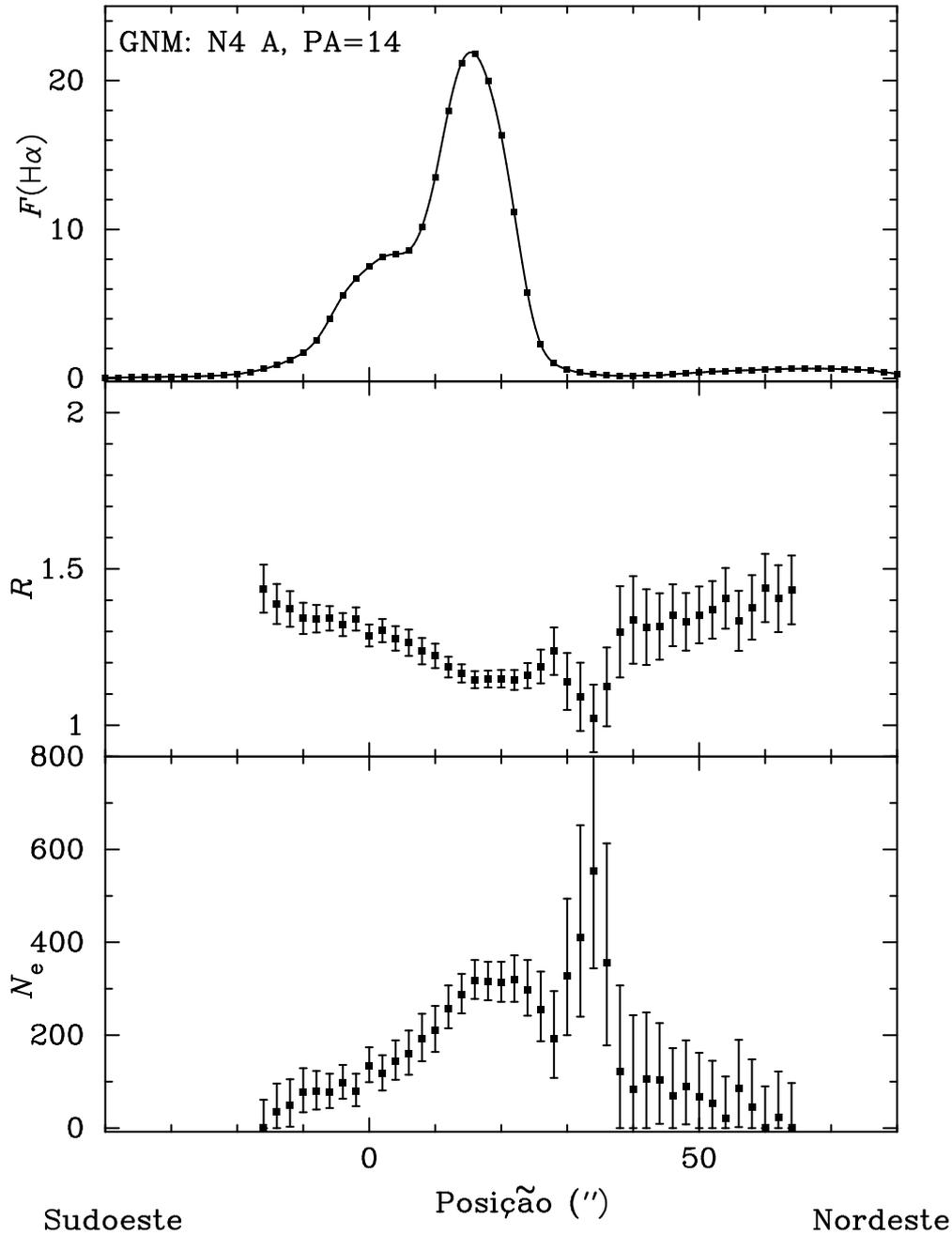


Figura 45 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N4 A com posição de fenda de $\text{PA} = 14^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

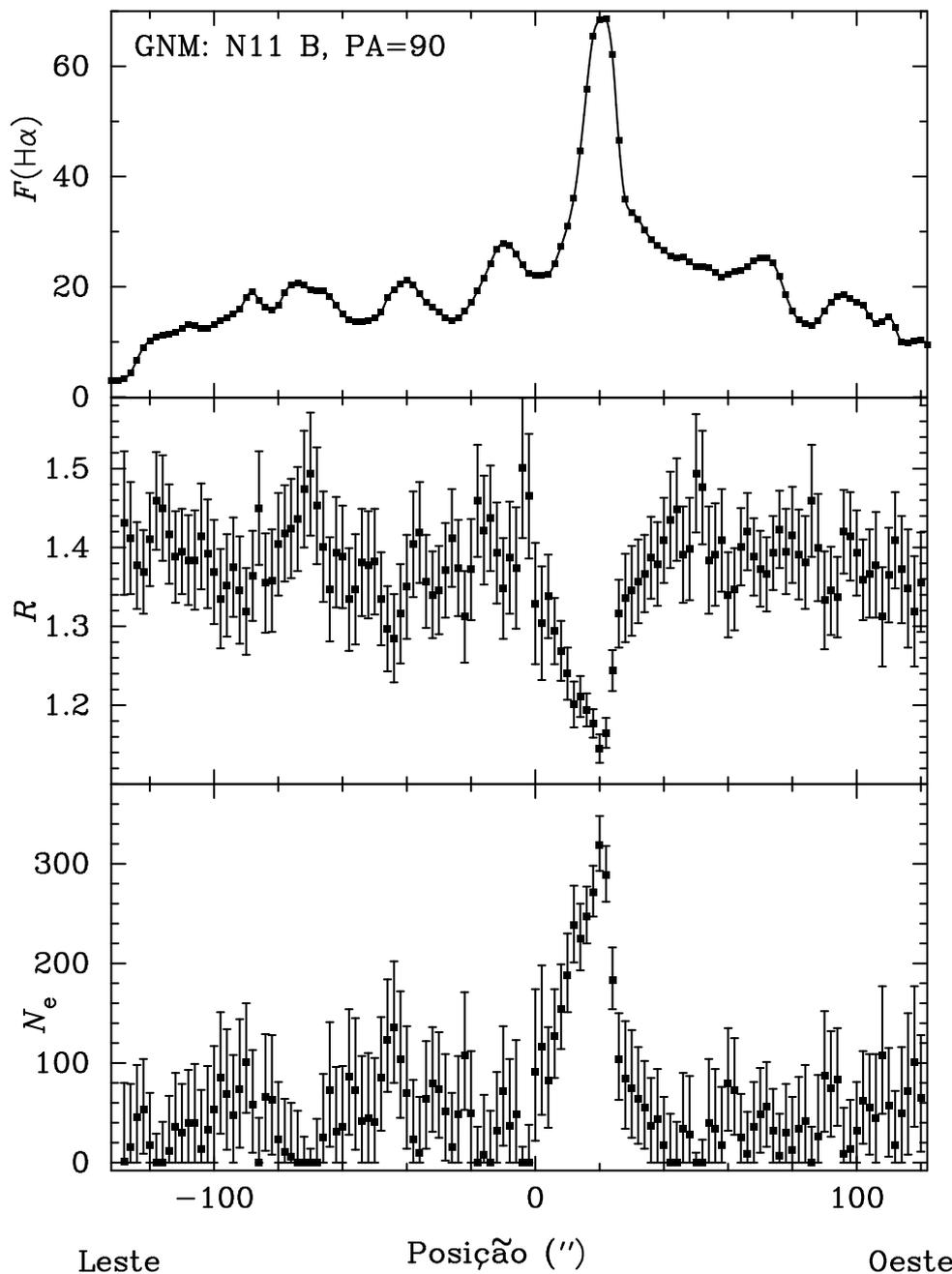


Figura 46 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N11 B com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

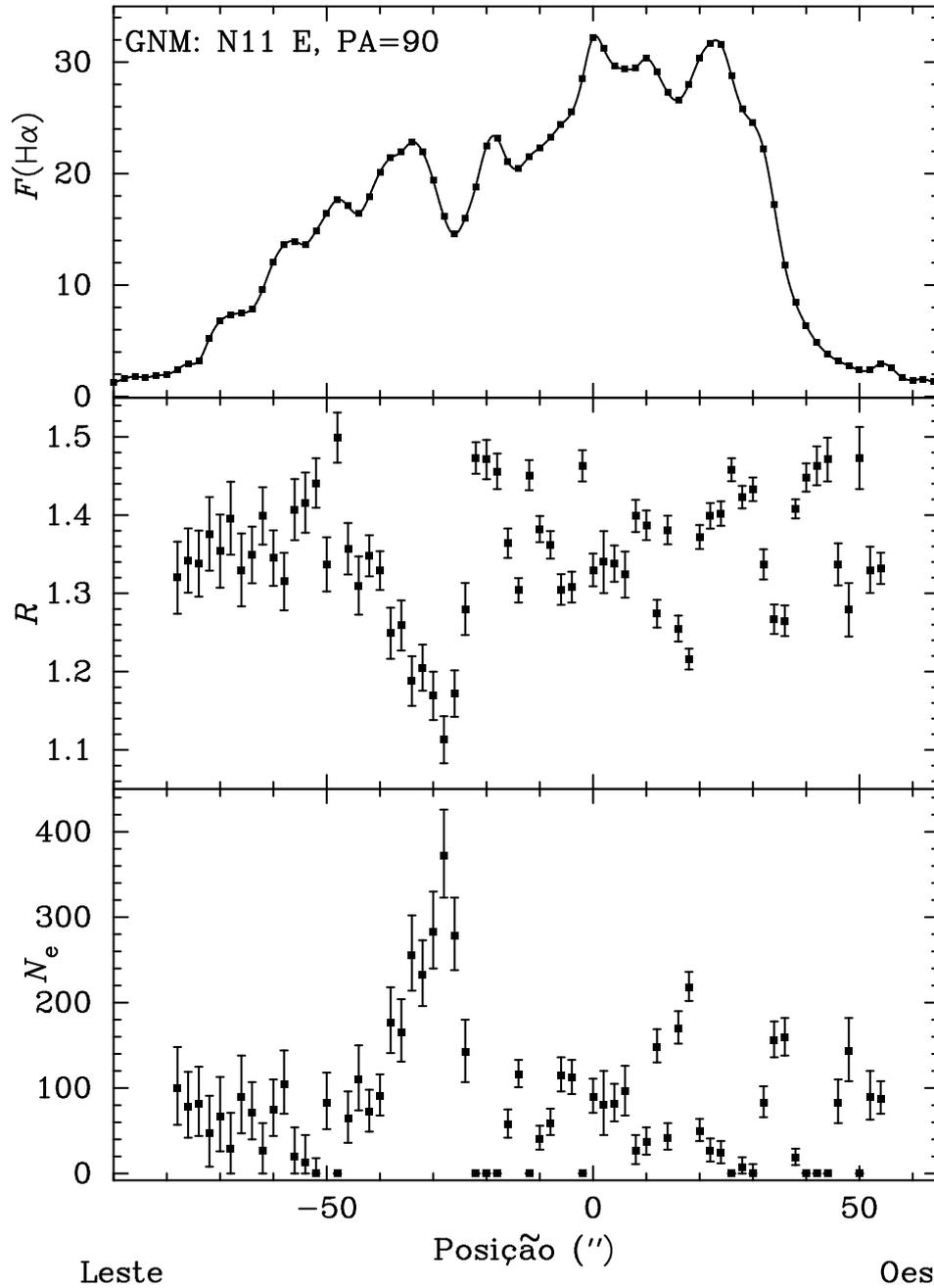


Figura 48 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N11 E com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

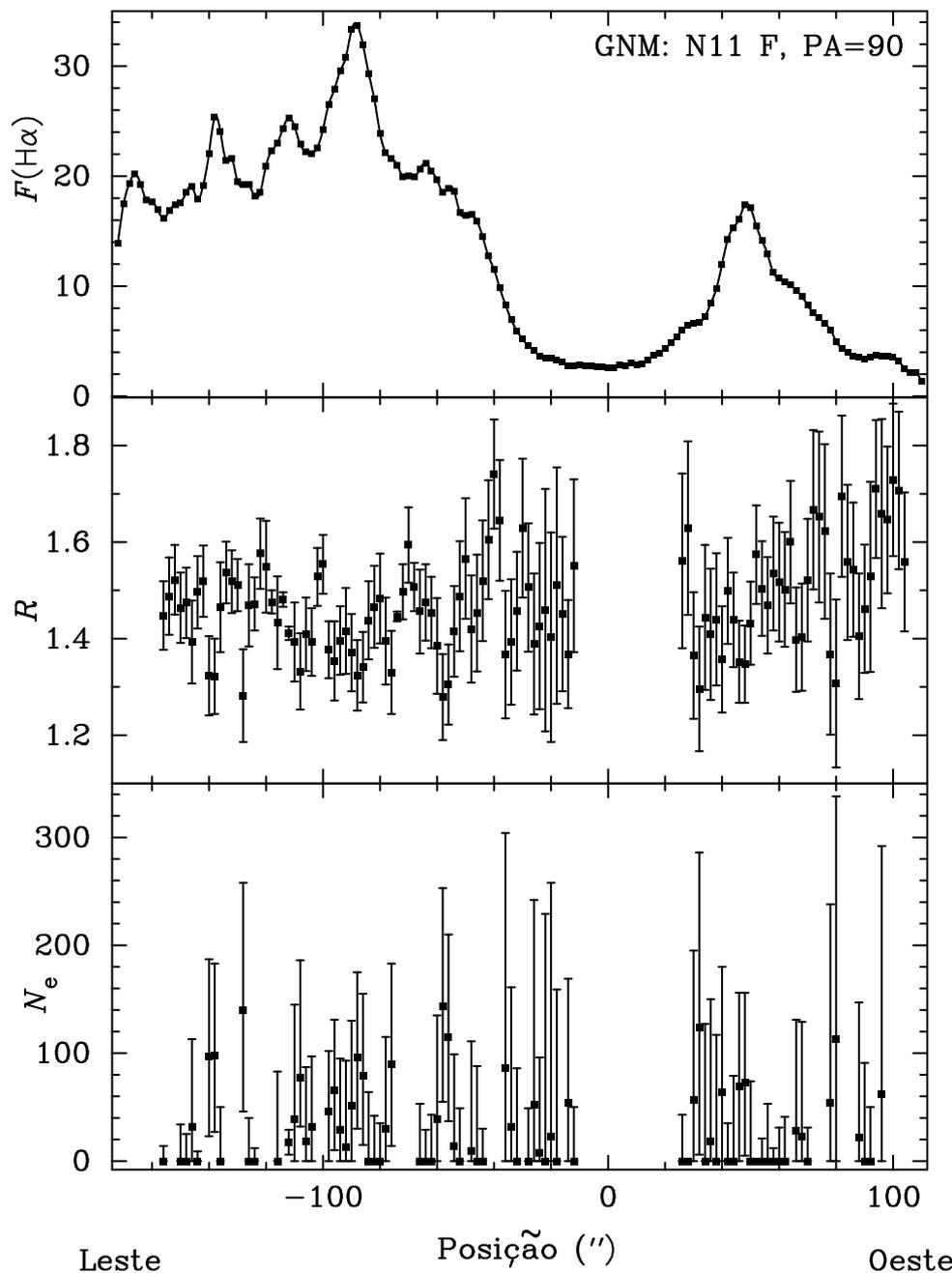


Figura 49 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S\text{ II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N11 F com posição de fenda de $PA = 90^\circ$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

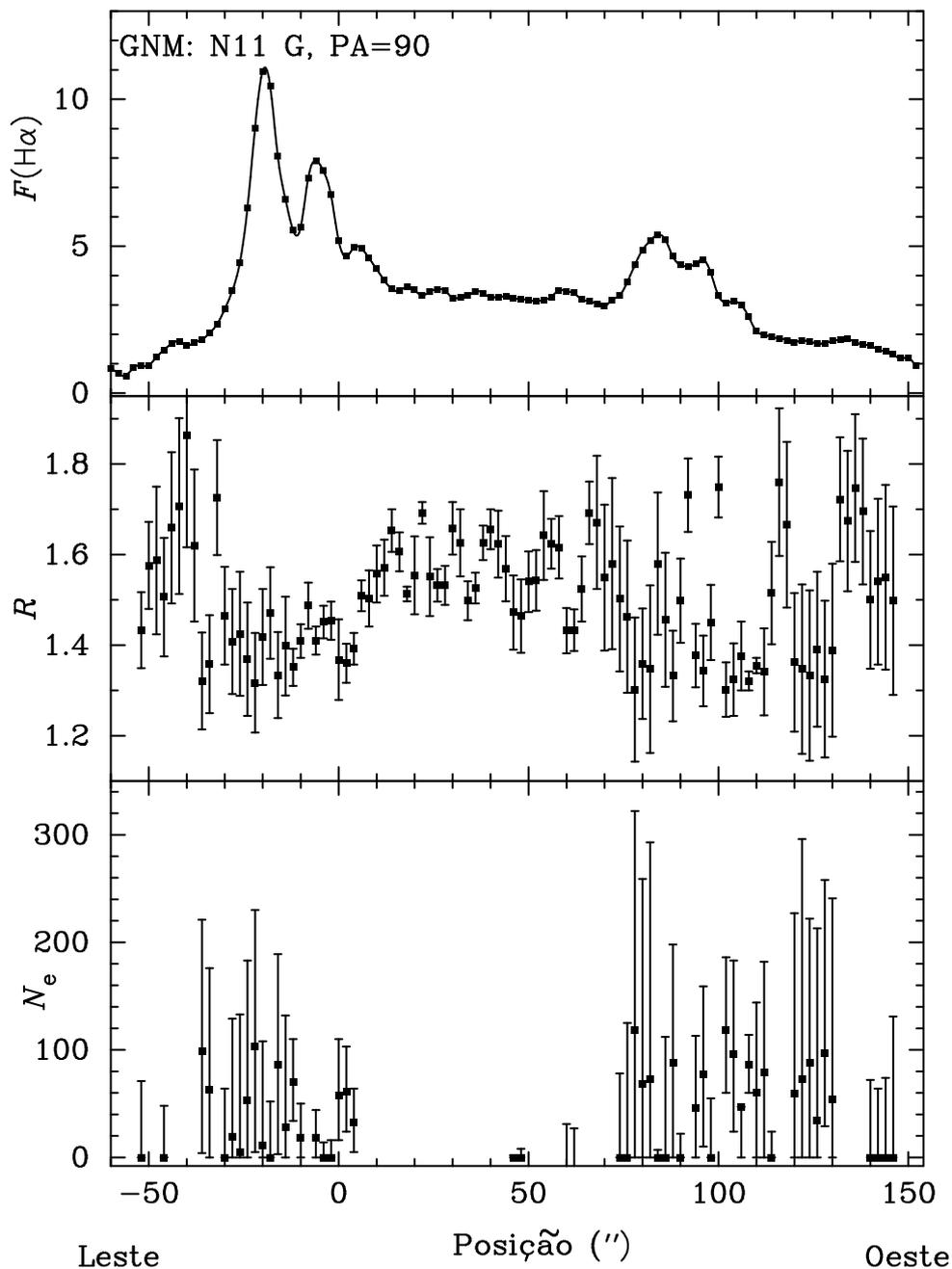


Figura 50 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N11 G com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

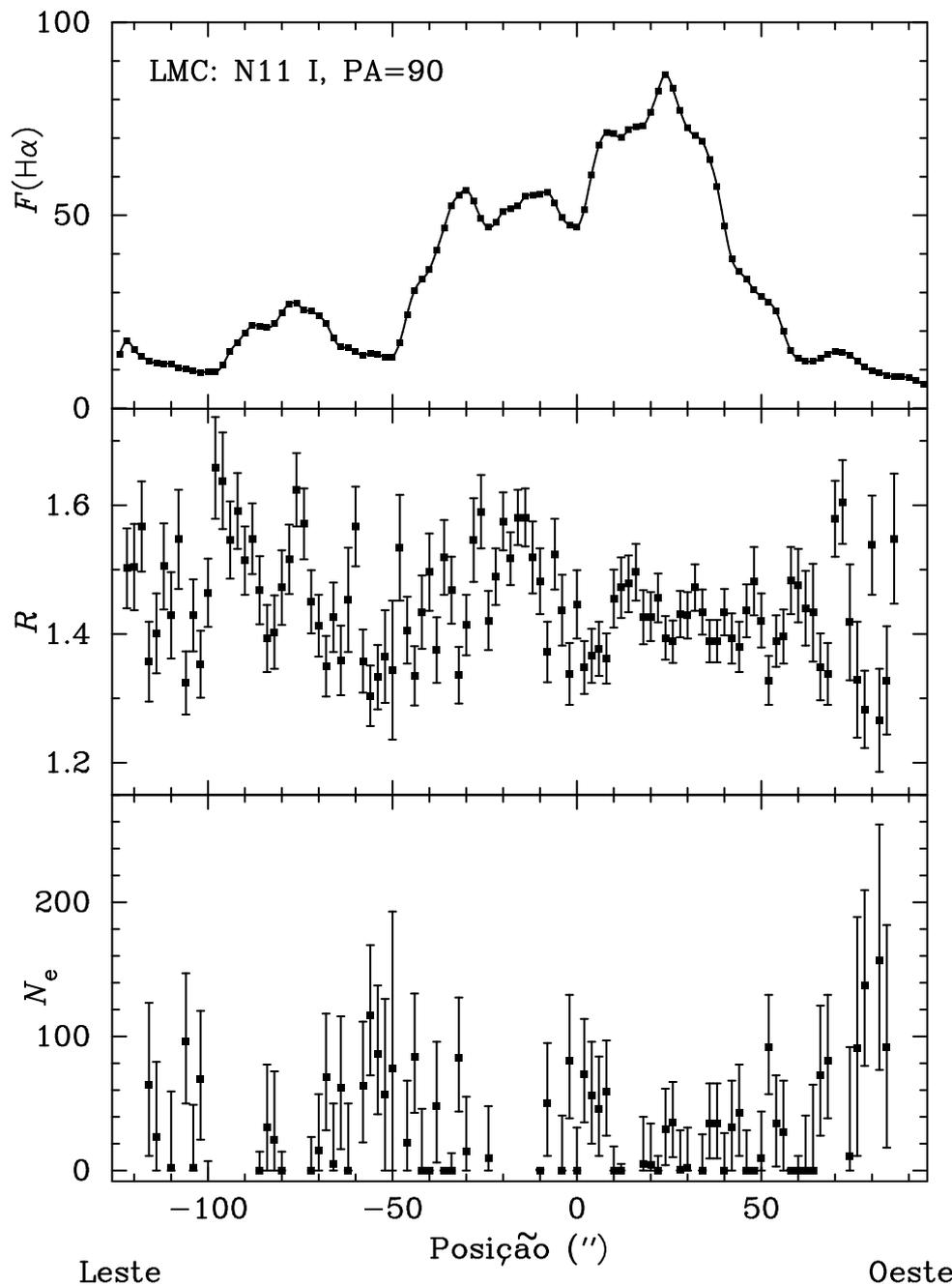


Figura 51 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S\text{ II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N11 I com posição de fenda de $PA = 90^\circ$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

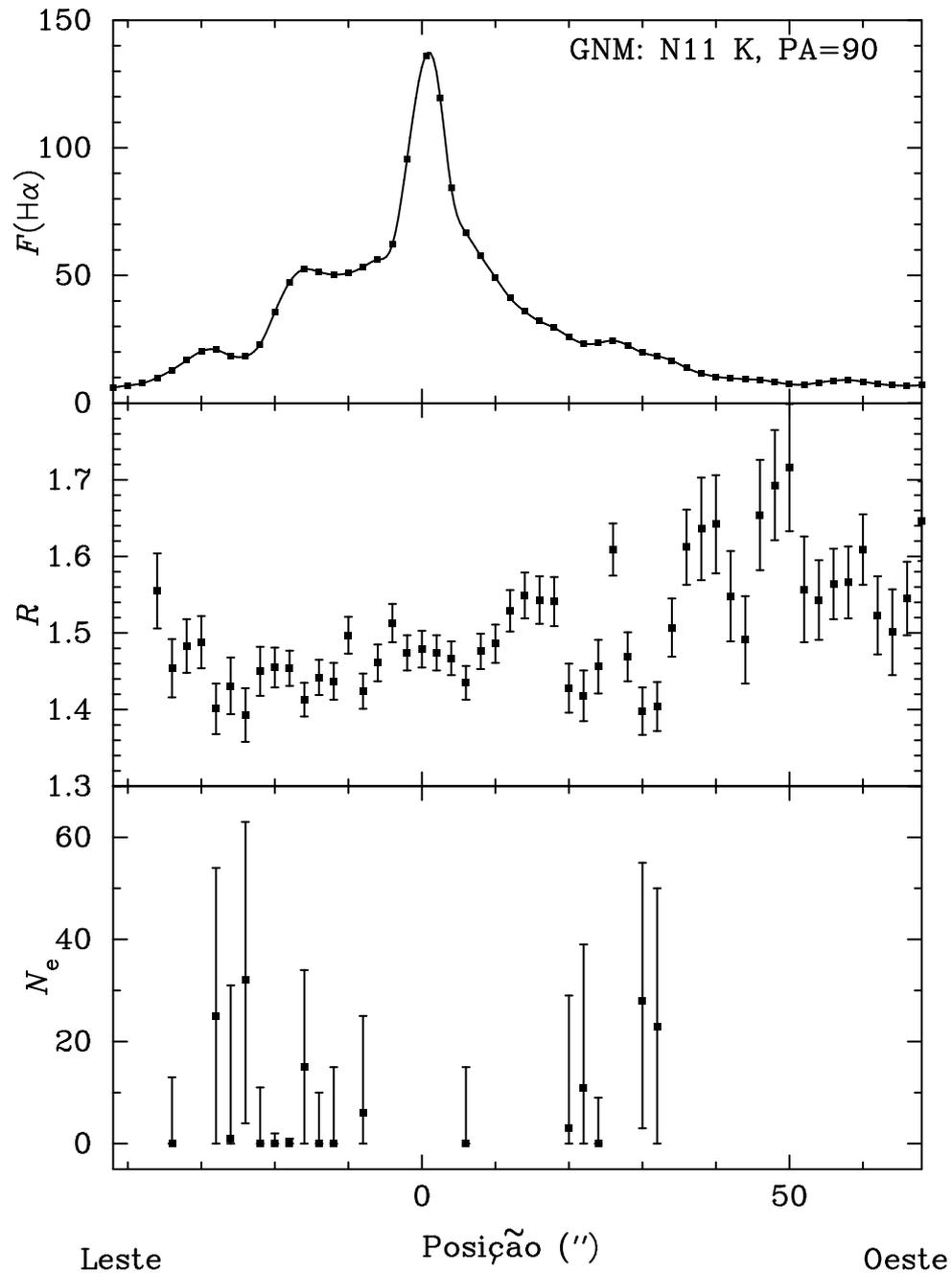


Figura 52 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S\ II]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N11 K com posição de fenda de $PA = 90^\circ$. As posições são relativas à estrela adotada como referência.

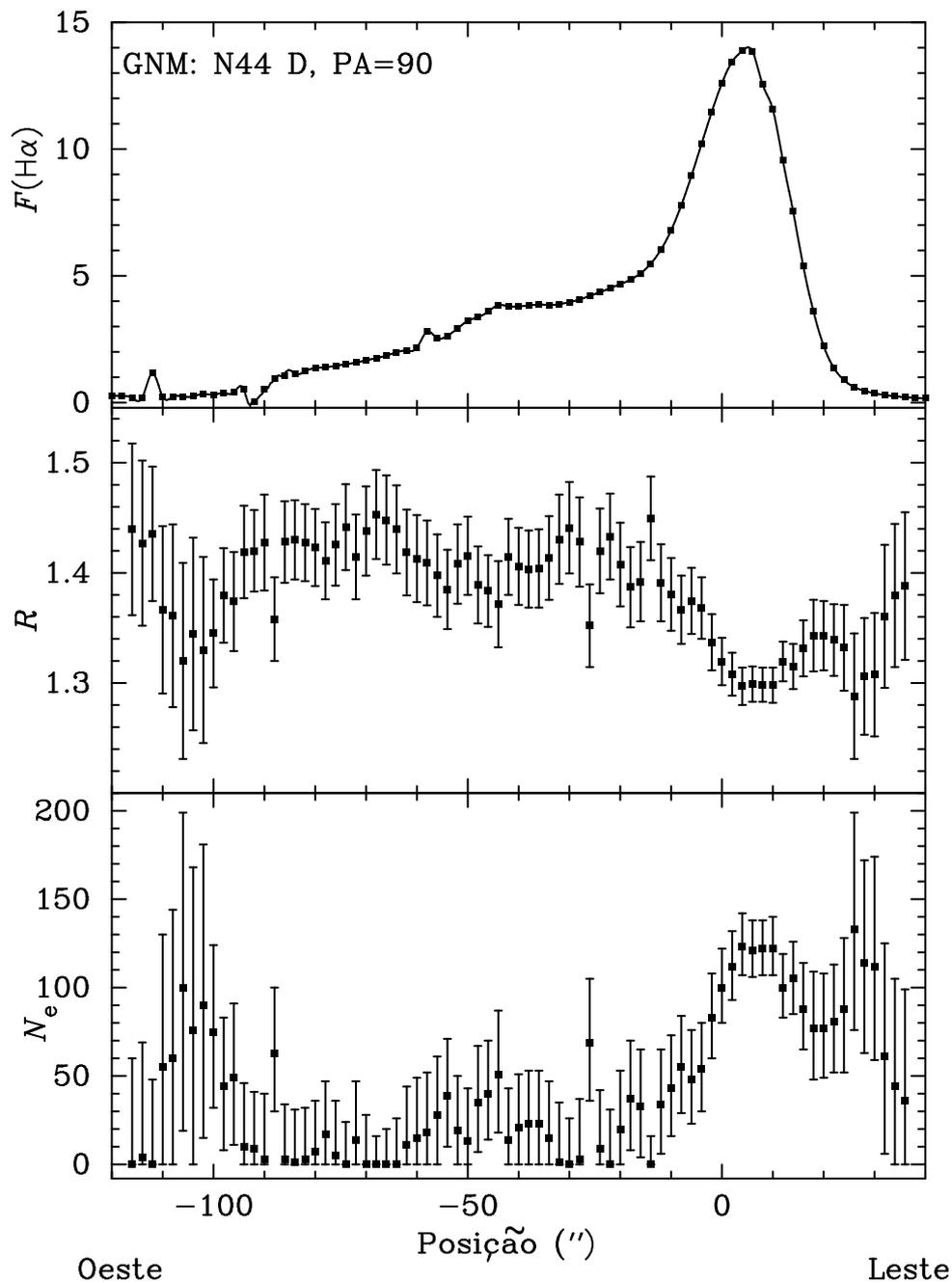


Figura 53 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N4 D com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

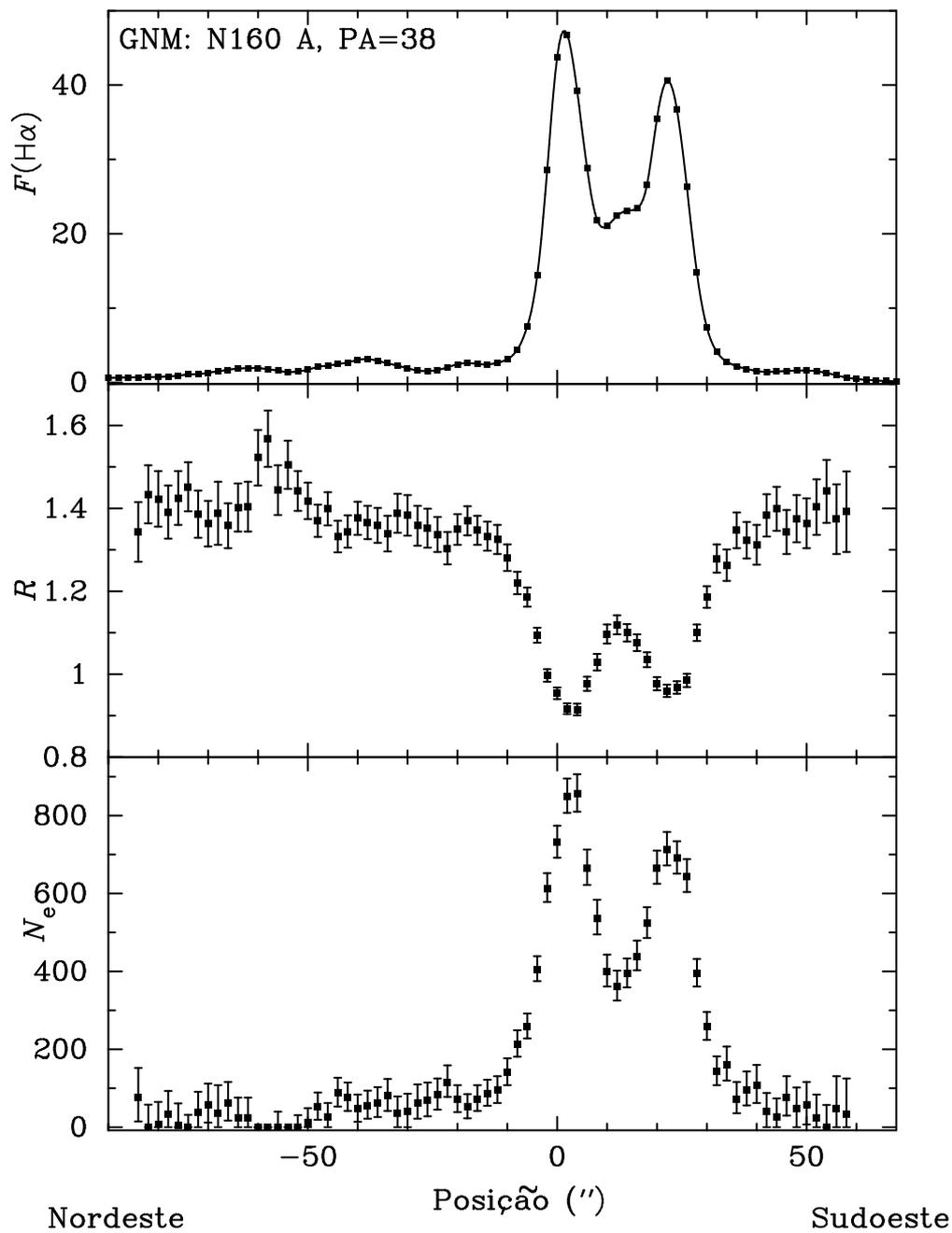


Figura 54 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N160 A com posição de fenda de $\text{PA} = 38^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

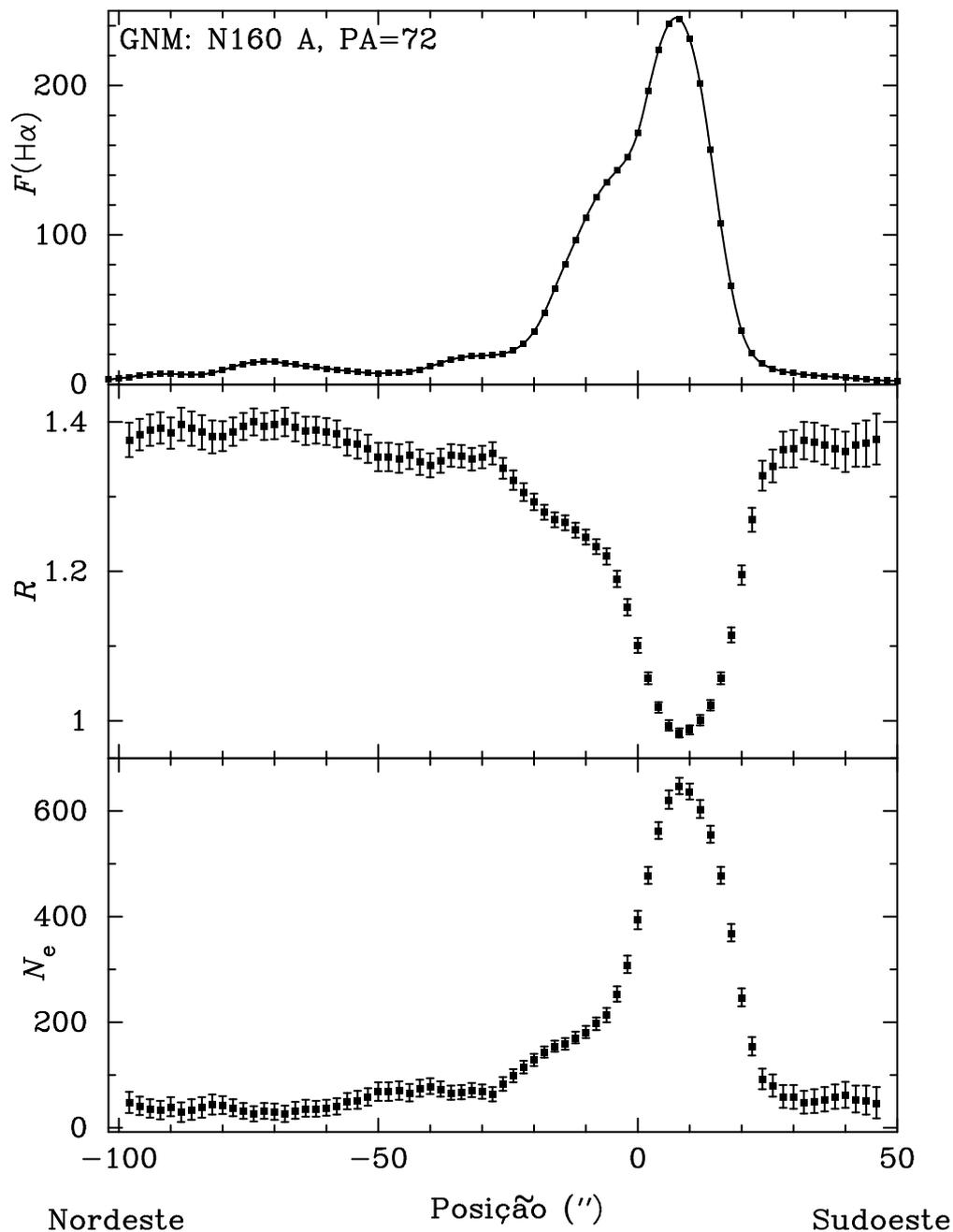


Figura 55 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em GNM: N160 A com posição de fenda de $\text{PA} = 72^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

PNM: N63 possui um fraco brilho superficial em $H\alpha$ e os valores de densidade estimados foram muito baixos (Figura 57), apresentando uma mediana menor do que 50 cm^{-3} assim como a média ponderada. É possível identificar que a região central da nebulosa apresenta valores mais elevados de densidade eletrônica, mas sem caracterizar a existência de um pico, apenas um patamar mais elevado de densidade. Outro objeto que possui características físicas semelhantes é PNM: N77 A (Figura 58), com baixo brilho superficial e a mediana de densidade eletrônica virtualmente nula. Porém, este objeto apresenta um fraco pico de densidade alinhado com o brilho máximo em $H\alpha$, assim como uma possível queda abrupta de densidade eletrônica na direção Leste.

Já PNM N81 apresenta alto brilho em $H\alpha$ e um perfil de densidade com forma aproximadamente gaussiana, com um pico bem definido ($1181_{-348}^{+540} \text{ cm}^{-3}$) ligeiramente deslocado em relação ao máximo do fluxo em $H\alpha$ (Figura 59). Também é possível identificar uma queda abrupta de densidade eletrônica na direção Sudeste. O local onde esta variação brusca ocorre, no limite externo da nebulosa, caracteriza o efeito champagne, porém uma conclusão definitiva só seria possível com medidas de velocidade radial. Dufour & Killen (1977) obtiveram um espectro integrado sobre PNM: N81, sendo a densidade eletrônica recalculada foi de 369 cm^{-3} (Tabela 12), que se encontra entre a mediana e a média ponderada estimadas pelo presente trabalho. Dufour *et al.* (1982) observaram sobre a seção mais brilhante desta nebulosa, e recalculando a densidade em $N_e = 376 \text{ cm}^{-3}$ (Tabela 12), obtiveram um valor muito próximo ao de Dufour & Killen (1977). Partindo do valor integrado apresentado por Heydari-Malayeri *et al.* (1988) de diversos pontos sobre a nebulosa, foi possível recalculer a densidade eletrônica obtendo-se 451 cm^{-3} (Tabela 12), sendo próximo à media ponderada estimados com as medidas do presente trabalho. Wilcots (1994) obteve medidas integradas sobre o núcleo brilhante de PNM: N81 da razão de linhas utilizadas como sensor de densidade eletrônica. Desta forma foi possível recalculer uma densidade integrada de 260 cm^{-3} (Tabela 12), sendo aproximadamente igual à densidade mediana estimada neste trabalho. A densidade recalculada para a razão de linha indicada em Vermeij *et al.* (2002 a,b) foi de 93 cm^{-3} (Tabela 12), um valor extremamente baixo, muito menor que a densidade mediana estimada para o trabalho atual. Além disso, esta foi a maior variação encontrada entre o valor apresentado pelos autores e o recalculado, possivelmente há algum problema com o valor de razão de linhas apresentado no artigo.

PNM N83 A,C foi observado utilizando duas posições diferentes de fenda. Em $PA = 50^\circ$ a distribuição de densidade eletrônica apresenta um pico suave com uma queda abrupta na direção Sudoeste (Figura 60). O pico de densidade está ligeiramente deslocado em relação ao máximo de fluxo em $H\alpha$, também para Sudoeste. Já para $PA = 90^\circ$ a distribuição de densidade apresentou um pico bem definido e deslocado para Leste em relação ao pico

de brilho da nebulosa (Figura 60). A distribuição de densidade eletrônica apresenta uma queda abrupta e bem acentuada na direção Leste. Para ambas posições, esta queda ocorreu no limite externo da nebulosa, sugerindo a ocorrência do efeito champagne. PNM: N83 A,C foi observada por Pagel *et al.*(1978) que apresentaram uma razão de linhas do [S II] integrada em toda a fenda. Porém não foi possível recalculer a densidade eletrônica, pois a razão de linha estava além do limite superior de convergência do modelo de átomos de 5 níveis adotado para a estimativa de densidade. Desta forma, adotou-se que a densidade recalculada é nula ou extremamente baixa, o que condiz com o observado, visto que a densidade mediana calculada no presente trabalho é baixa (61 cm^{-3}).

PNM N88 também foi observada utilizando duas posições de fenda, ambas com perfil em forma de sino, e apresentando um valor de pico de densidade eletrônica bem definido (Figuras 62 e 63). Para $PA = 90^\circ$ os picos de densidade eletrônica, 1434 cm^{-3} , e fluxo em $H\alpha$ estão alinhados, apresentando uma mediana de densidade de baixo valor, 35 cm^{-3} . Por outro lado a média ponderada por fluxo em $H\alpha$ estimada apresenta um valor mais elevado (358 cm^{-3}), maior até que o $Q3$ estimado neste trabalho. Esta diferença entre a mediana e a média ponderada indica a existência de um forte pico de densidade bem localizado, com densidades muito baixas ao redor. Os perfis de densidade eletrônica apresentam esta característica, assim como uma queda mais acentuada de densidade na direção Oeste da nebulosa, possivelmente indicando a ocorrência do efeito champagne neste objeto. Para $PA = 106^\circ$ os picos de densidade, 1434 cm^{-3} , e fluxo em $H\alpha$ estão levemente deslocados, a densidade eletrônica mediana é próxima a zero (7 cm^{-3}). Neste caso, a distribuição de densidade apresenta uma queda abrupta acentuada na direção Sudeste, no limite da nebulosidade, reinterando a ocorrência do efeito champagne. Possivelmente existe uma nuvem molecular localizada a Sul e Sudeste deste objeto dificultando a expansão do gás nesta direção. Wilcots (1994) observou sobre o núcleo mais brilhante de PNM: N88 e apresentam as medidas integradas em áreas de dois tamanhos angulares diferentes. Os valores recalculados de densidade eletrônica para cada seção foi de 280 cm^{-3} , região f , e 473 cm^{-3} , região O (Tabela 12). A primeira região foi integrada sobre uma área maior, portanto, sendo uma média em mais pontos, e o valor encontrado é aproximadamente igual ao terceiro quartil das medidas do presente trabalho. A segunda região é integrada em uma área menor, centrada sobre a seção mais brilhante do objeto, por isso o valor recalculado é maior que $Q3$, porém aproximadamente iguais ao valor da média ponderada calculada no presente trabalho. Vermeij *et al.* (2002 a,b) apresentaram uma razão de linha integrada sobre o centro do objeto e a densidade eletrônica recalculada foi de 305 cm^{-3} (Tabela 12). Embora este valor seja representativo, próximo à média, novamente tem-se uma grande diferença entre o valor indicado no artigo desses autores e o recalculado, semelhante ao caso de PNM: N81 para estes mesmos autores. O que leva ao reforço na

hipótese da existência de algum problema nas medidas apresentadas nesse artigo.

Os perfis de NGC 346 apresentam uma distribuição de densidade eletrônica praticamente plana e homogênea, com flutuações estatísticas em torno da média, sendo que os valores estimados foram extremamente baixos. Salvo em algumas posições de fenda que um pico suave pôde ser identificado, como nas posições 35''N (Figura 65), 5''S (Figura 73), 15''S (Figura 75) e 25''S (Figura 77). Para as posições 35 (Figura 66) e 40''S (Figura 64) é possível observar um patamar de densidade mais elevado centrado na seção mais brilhante do objeto. De forma geral os valores estimados foram muito baixos. Por exemplo, a densidade máxima estimada sobre todas as posições de fenda (2026 medidas) foi de 140 cm^{-3} com uma média ponderada por fluxo em $\text{H}\alpha$ de 54 cm^{-3} . A comparação com dados da literatura, para este objeto, foi realizada anteriormente para as estimativas de temperatura eletrônica, os mesmos autores também apresentam medidas de razão de linhas do [S II] utilizado aqui como sensor de densidade eletrônica. Dufour (1975) observou NGC 346 encontrando um valor para a razão de linhas do [S II] além do limite superior para a convergência do modelo atômico utilizado para estimar a densidade eletrônica no trabalho atual, indicando um valor nulo, ou aproximadamente nulo. O mesmo resultado foi encontrado para Peimbert & Torres-Peimbert (1976), embora tenham observado em posições diferentes sobre a nebulosa, os autores encontraram um valor de razão além do limite superior do modelo. Adotou-se uma densidade eletrônica nula. Peimbert *et al.* (2000) observou em várias posições sobre NGC 346, algumas delas coincidentes com a posição 0'' do trabalho atual. Todos os valores recalculados foram extremamente baixos, entre o $Q3$ e a média ponderada estimados no presente trabalho, exceto em duas posições em que as densidades recalculadas foram ligeiramente maiores que o valor máximo estimado aqui. Dos dados indicados em Tsamis *et al.* (2003) foi possível recalcular uma densidade integrada cujo valor é virtualmente igual à média ponderada do trabalho atual.

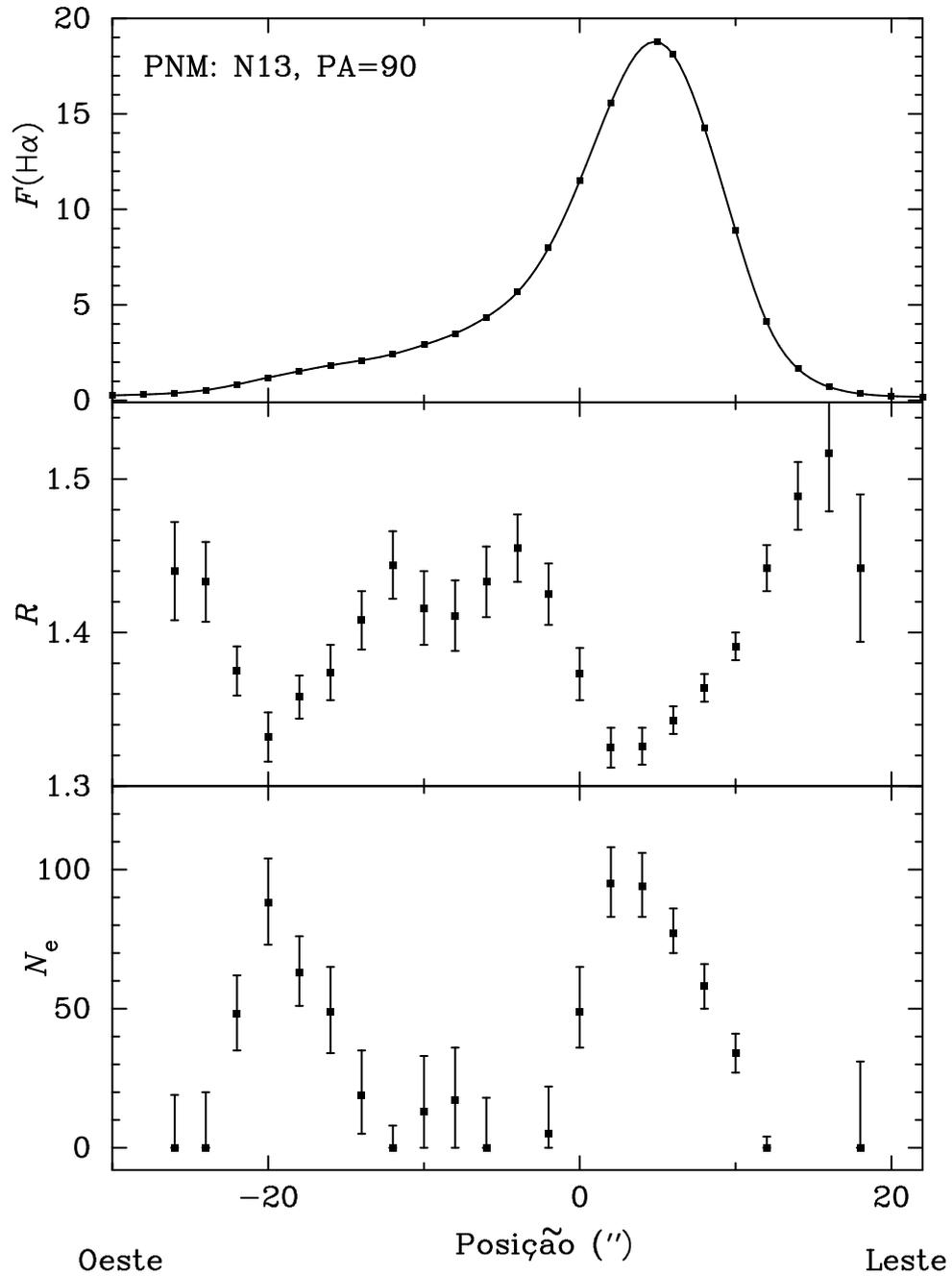


Figura 56 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: N13 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

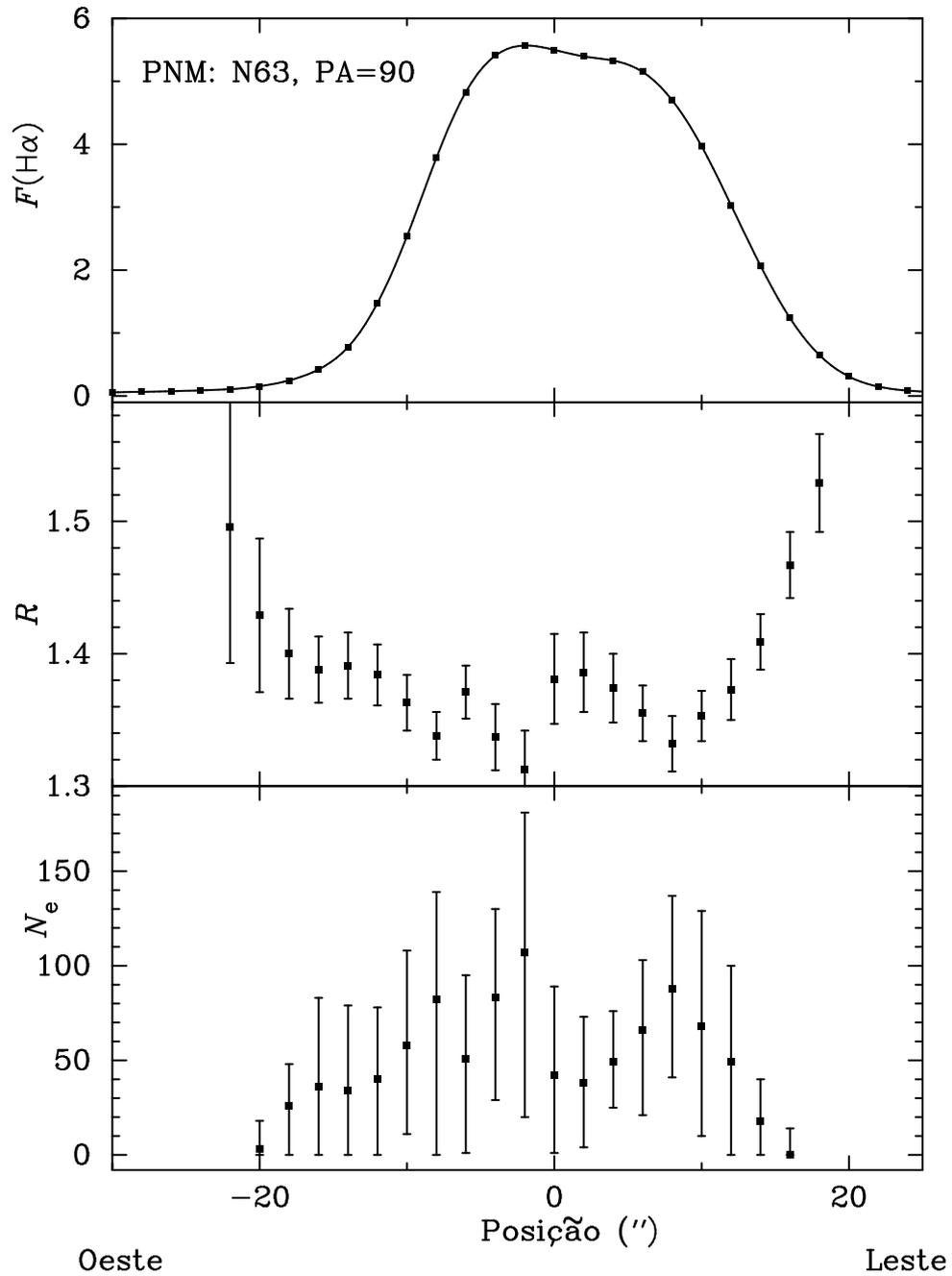


Figura 57 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: N63 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

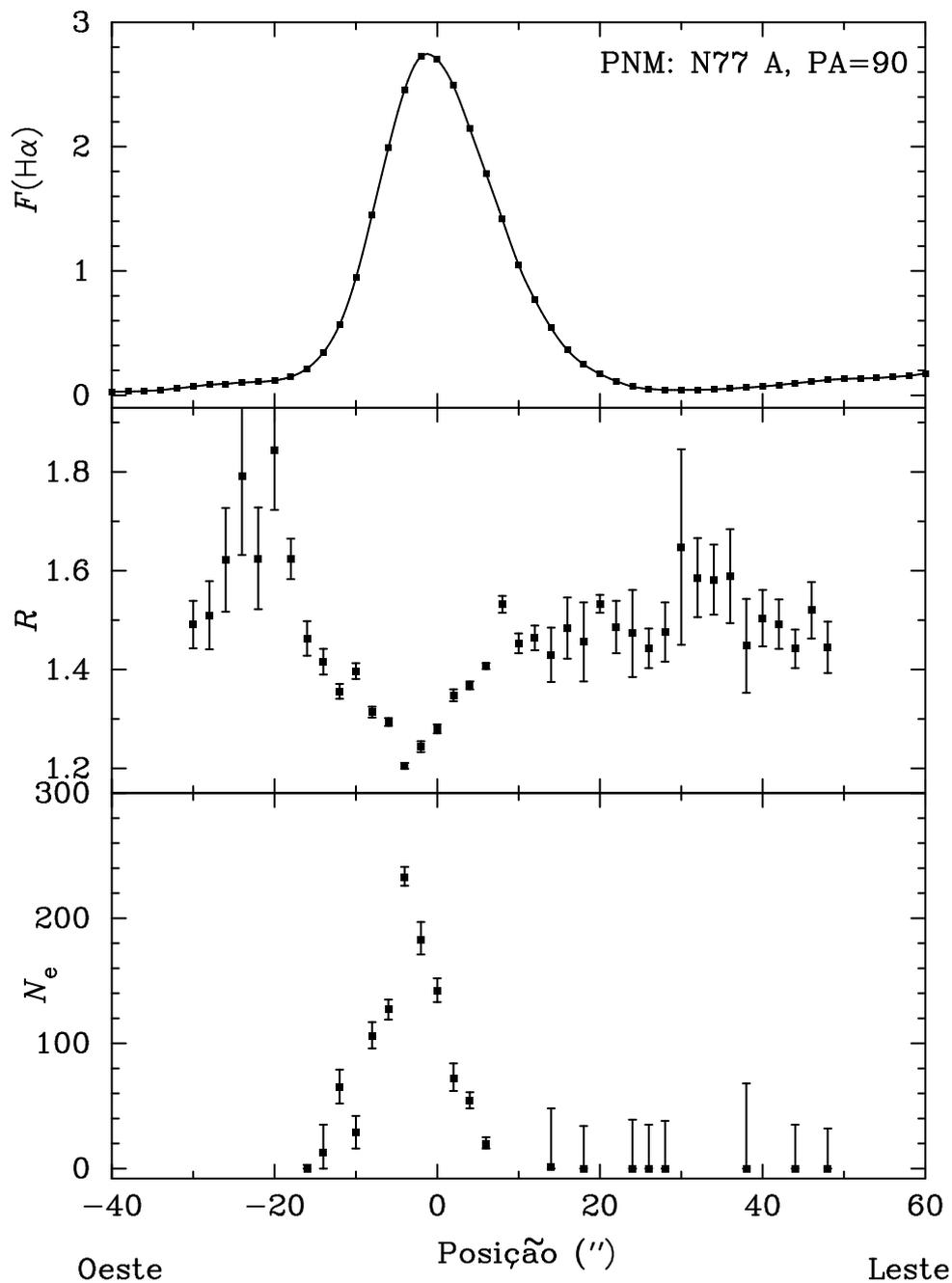


Figura 58 – Perfil espacial do fluxo em H α (10^4 contagens), da razão de linhas de [S II] $\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: N77 A com posição de fenda de PA = 90° . As posições são relativas ao centro da fenda.

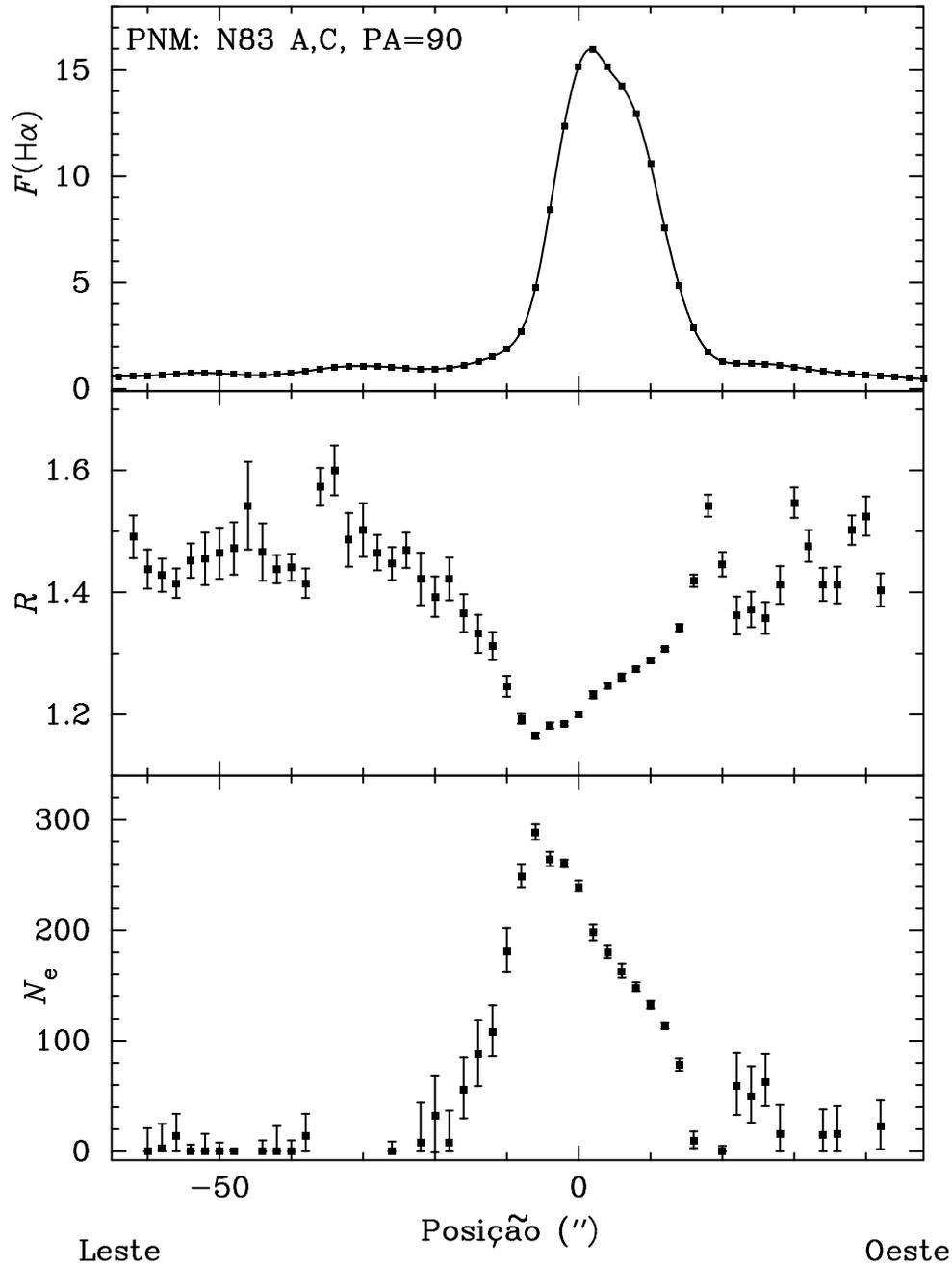


Figura 61 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: N83 A,C com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

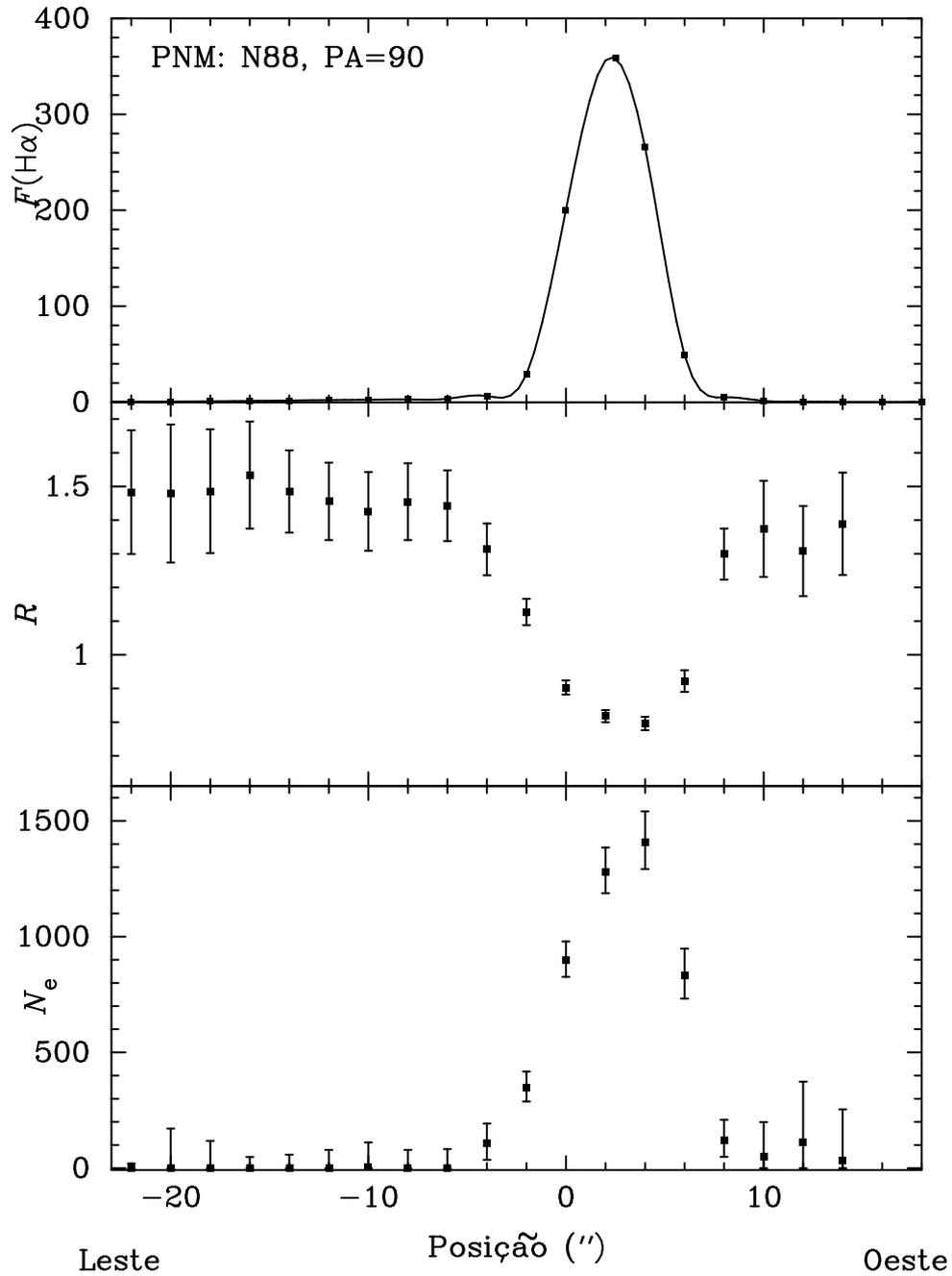


Figura 62 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^4 contagens), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: N88 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$. As posições são relativas ao centro da fenda.

Tabela 12 – Densidade eletrônica recalculada utilizando razões de linhas encontrados na literatura

Razão	N_e	Ref.	Seção	Razão	N_e	Ref.	Seção
30 Doradus							
1,056	479	[1]	I	1,200	239	[1]	II
0,975	671	[1]	III	1,156	302	[2]	1
1,243	185	[2]	2	1,048	496	[2]	3
1,178	270	[2]	4	1,105	386	[3]	
GNM: N4 A							
1,245	182	[1]		1,318	102	[2]	
1,269	154	[4]					
Complexo GNM: N11							
1,412	19	[5]	N11 B	1,352	70	[3]	N11 B
1,259	165	[6]	N11 B	1,273	149	[7]	N11 C
1,216	215	[7]	N11 E				
GNM: N160 A							
1,270	152	[5]		0,796	1400	[8]	A1
1,018	554	[8]	A2	1,169	278	[8]	A3
1,257	168	[2]	A1	1,258	166	[2]	A2
PNM: N13							
1,202	237	[6]					
PNM: N81							
1,115	369	[9]		1,111	376	[10]	
1,070	451	[11]		1,185	260	[12]	
1,327	93	[2]					
PNM: N83 A,C							
1,484	0	[6]					
PNM: N88							
1,171	280	[12]	f	1,059	473	[12]	O
1,155	304	[2]					
PNM: NGC 346							
1,475		[5]		1,511		[13]	
1,401	18	[14]	1	1,389	27	[14]	2
1,380	36	[14]	3	1,432		[14]	4
1,382	37	[14]	5	1,541		[14]	11
1,430		[14]	12	1,389	27	[14]	13
1,425		[14]	14	1,297	131	[14]	15
1,231	207	[14]	16	1,390	27	[14]	17
1,461		[14]	18	1,364	56	[3]	

Referências: [1] Peimbert & Torres-Peimbert (1974), [2] Vermeij *et al.* (2002a), [3] Tsamis *et al.* (2003), [4] Heydari-Malayeri & Lecavelier des Etangs (1994), [5] Dufour (1975), [6] Pagel *et al.* (1978), [7] Heydari-Malayeri *et al.* (1987), [8] Heydari-Malayeri & Testor (1986), [9] Dufour & Killen (1977), [10] Dufour *et al.* (1982), [11] Heydari-Malayeri *et al.* (1988), [12] Wilcots (1994), [13] Peimbert & Torres-Peimbert (1976), [14] Peimbert *et al.* (2000).

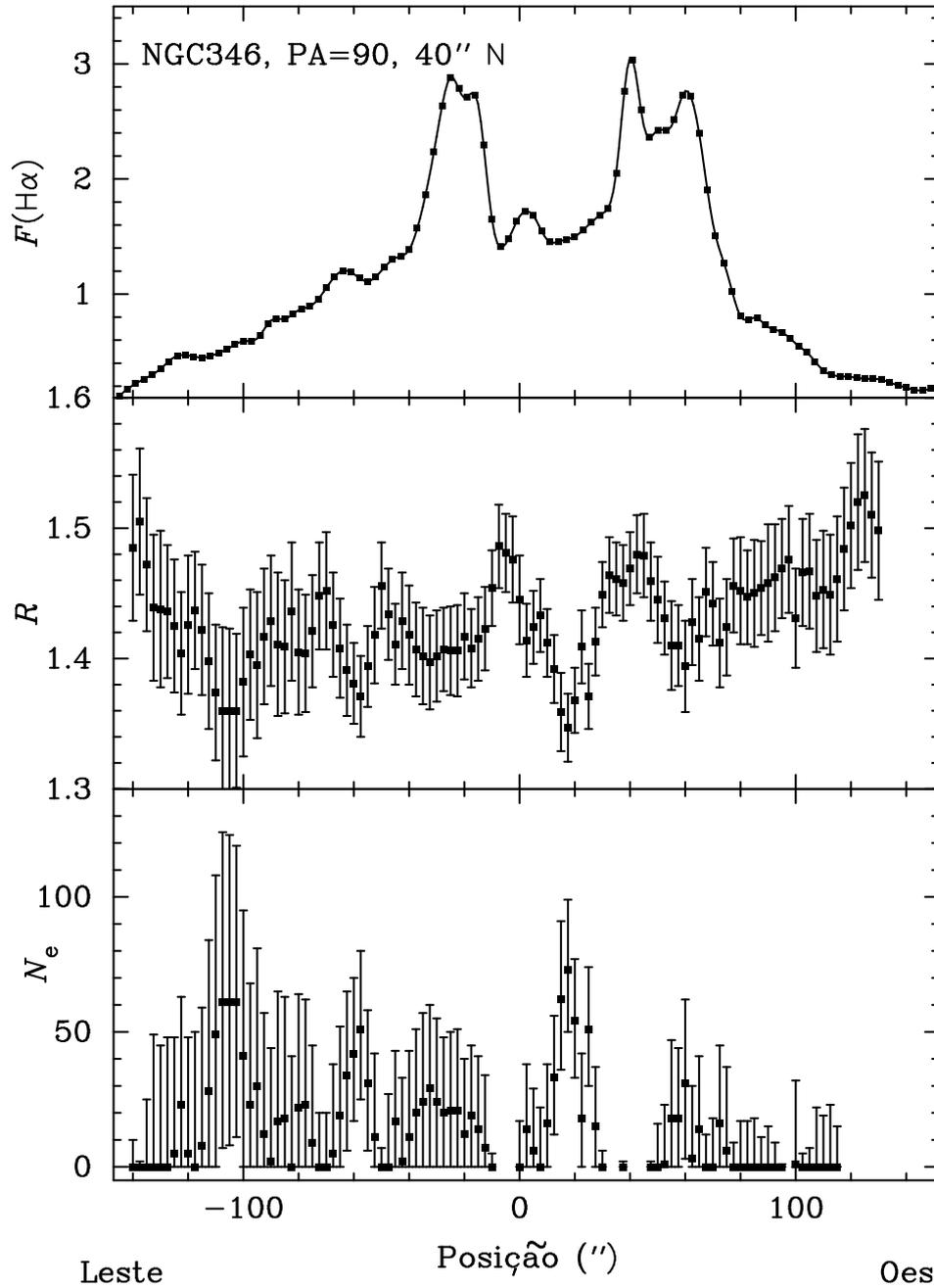


Figura 64 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 40''$ N. As posições são relativas ao centro da fenda.

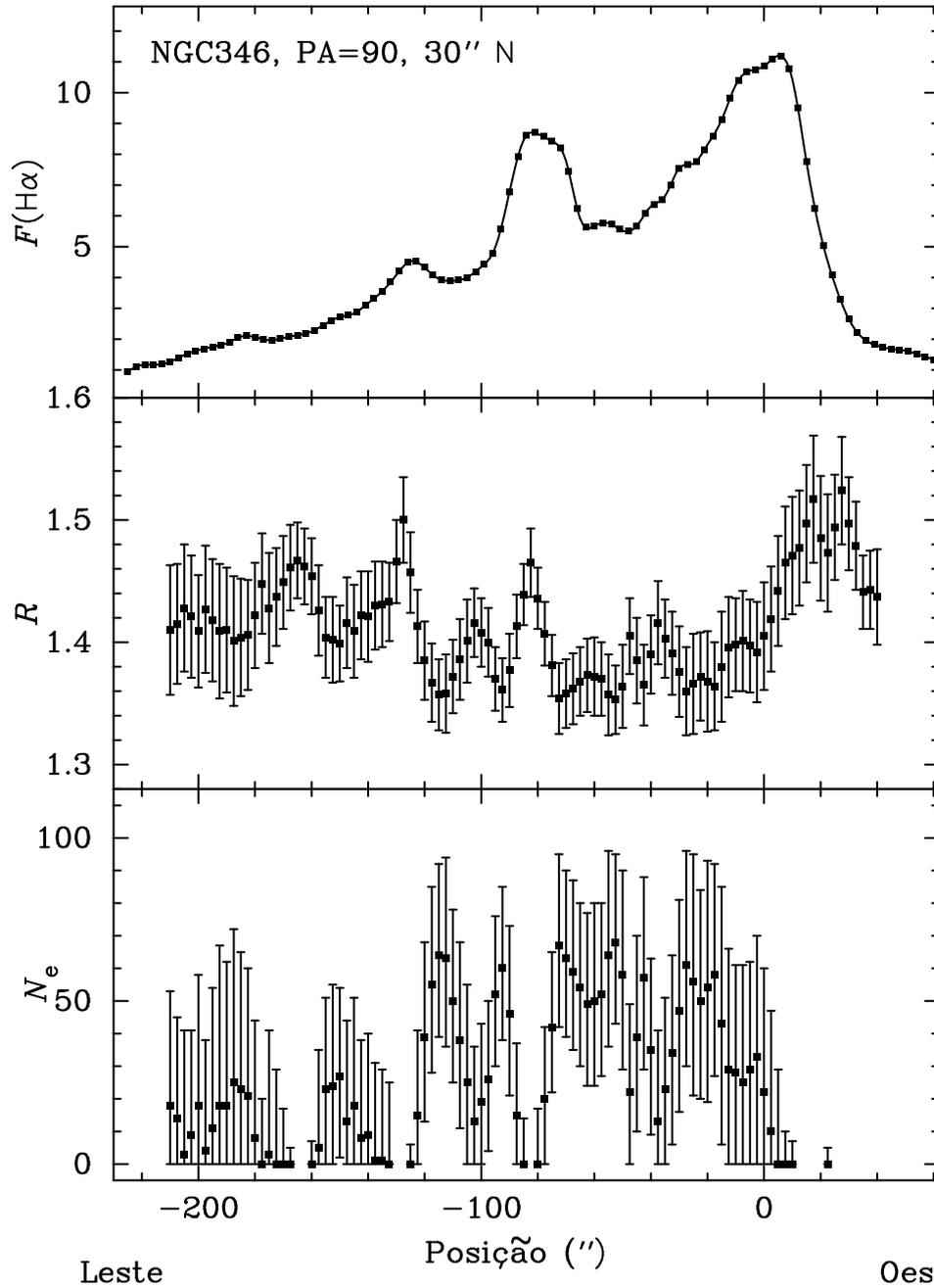


Figura 66 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 30''$ N. As posições são relativas ao centro da fenda.

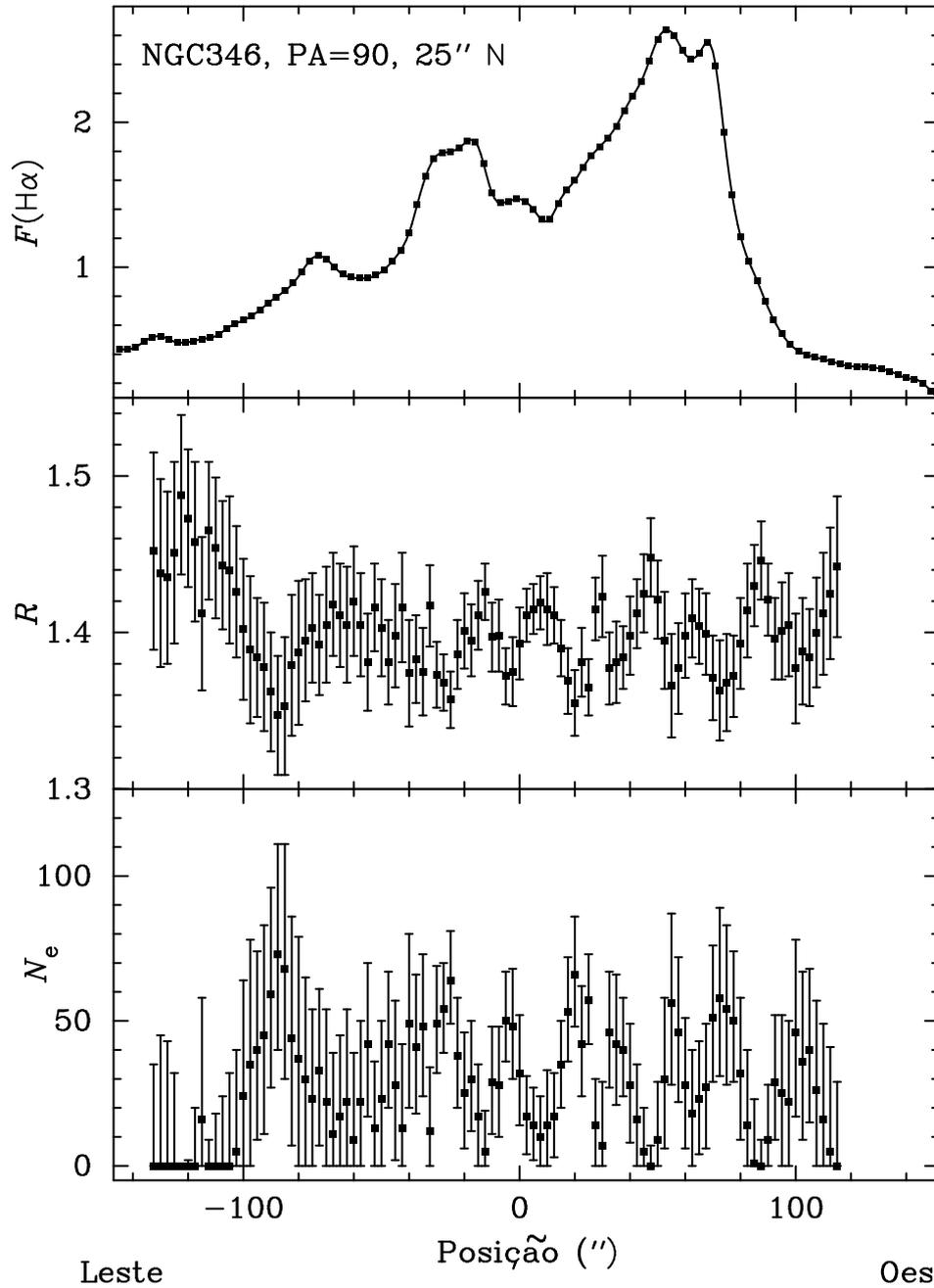


Figura 67 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 25''$ N. As posições são relativas ao centro da fenda.

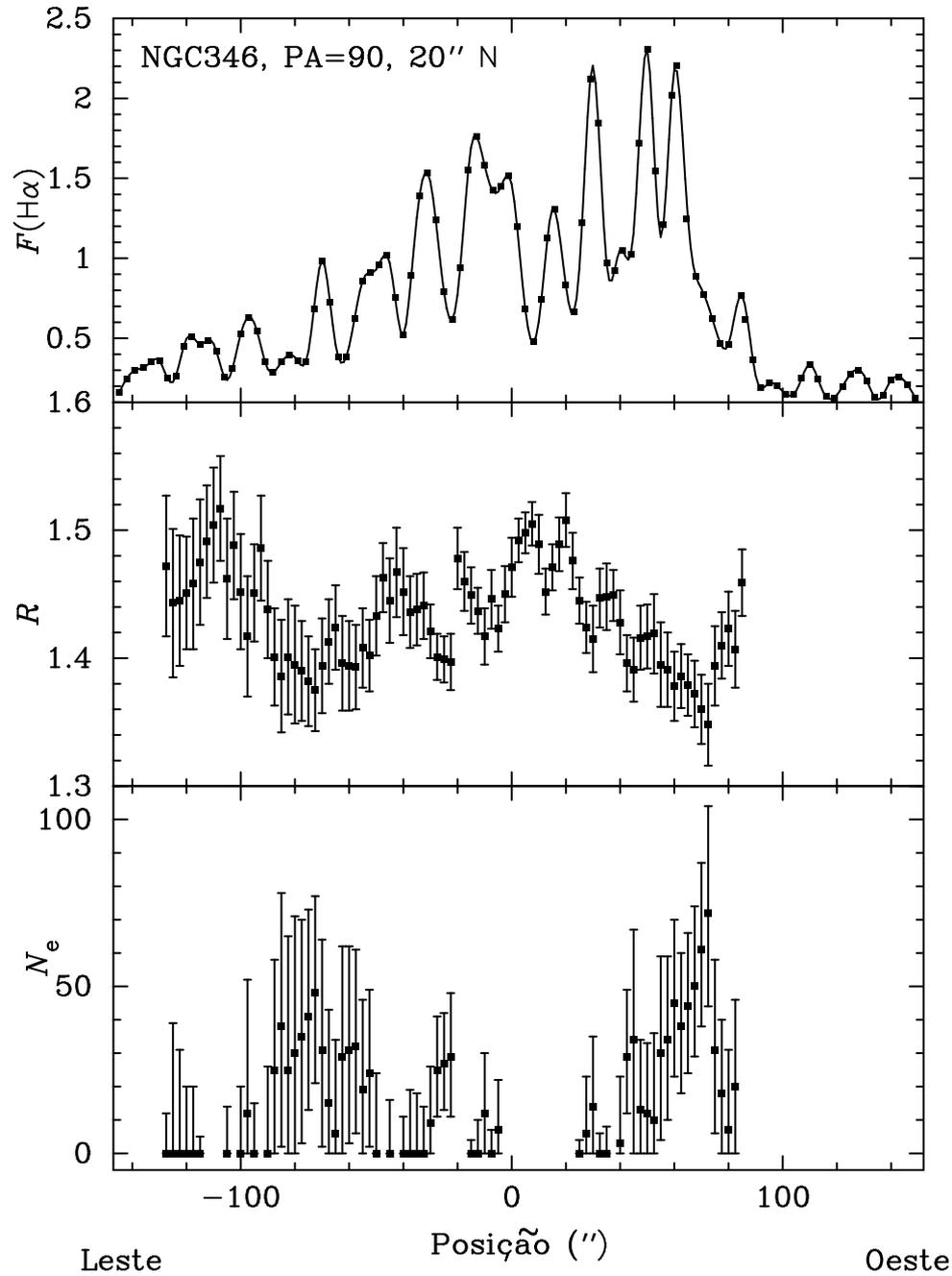


Figura 68 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 20''$ N. As posições são relativas ao centro da fenda.

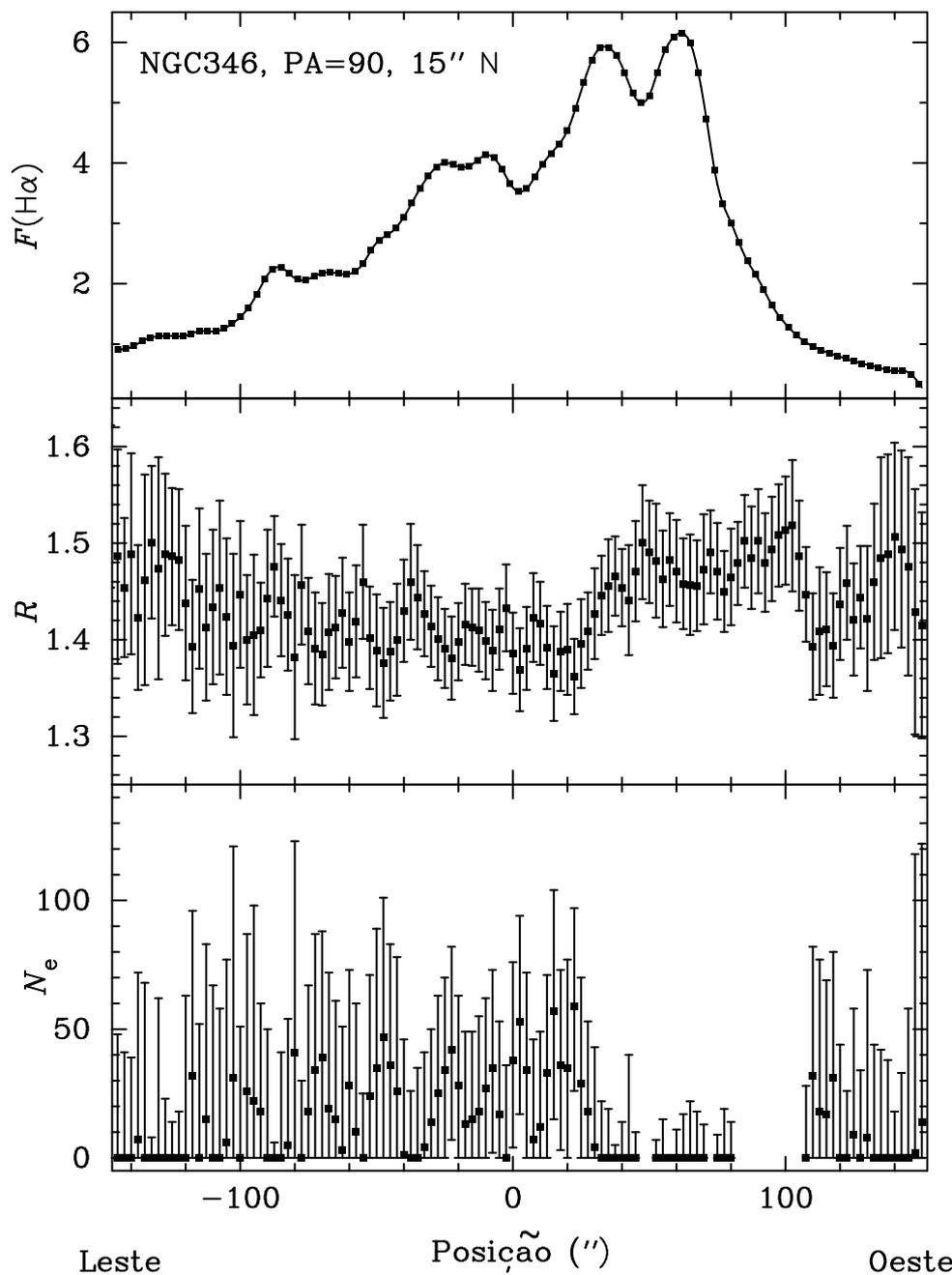


Figura 69 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 15''$ N. As posições são relativas ao centro da fenda.

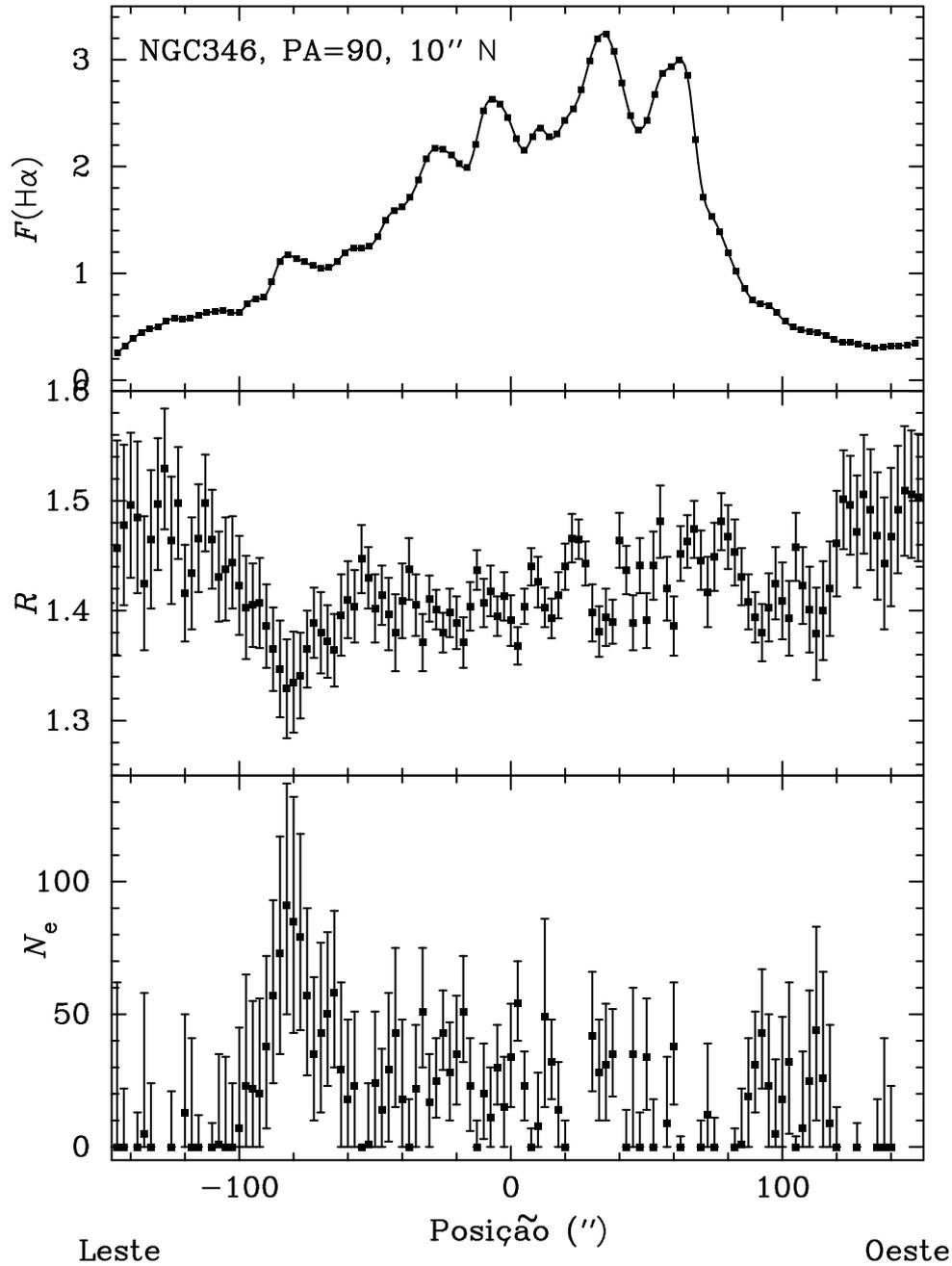


Figura 70 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 10''$ N. As posições são relativas ao centro da fenda.

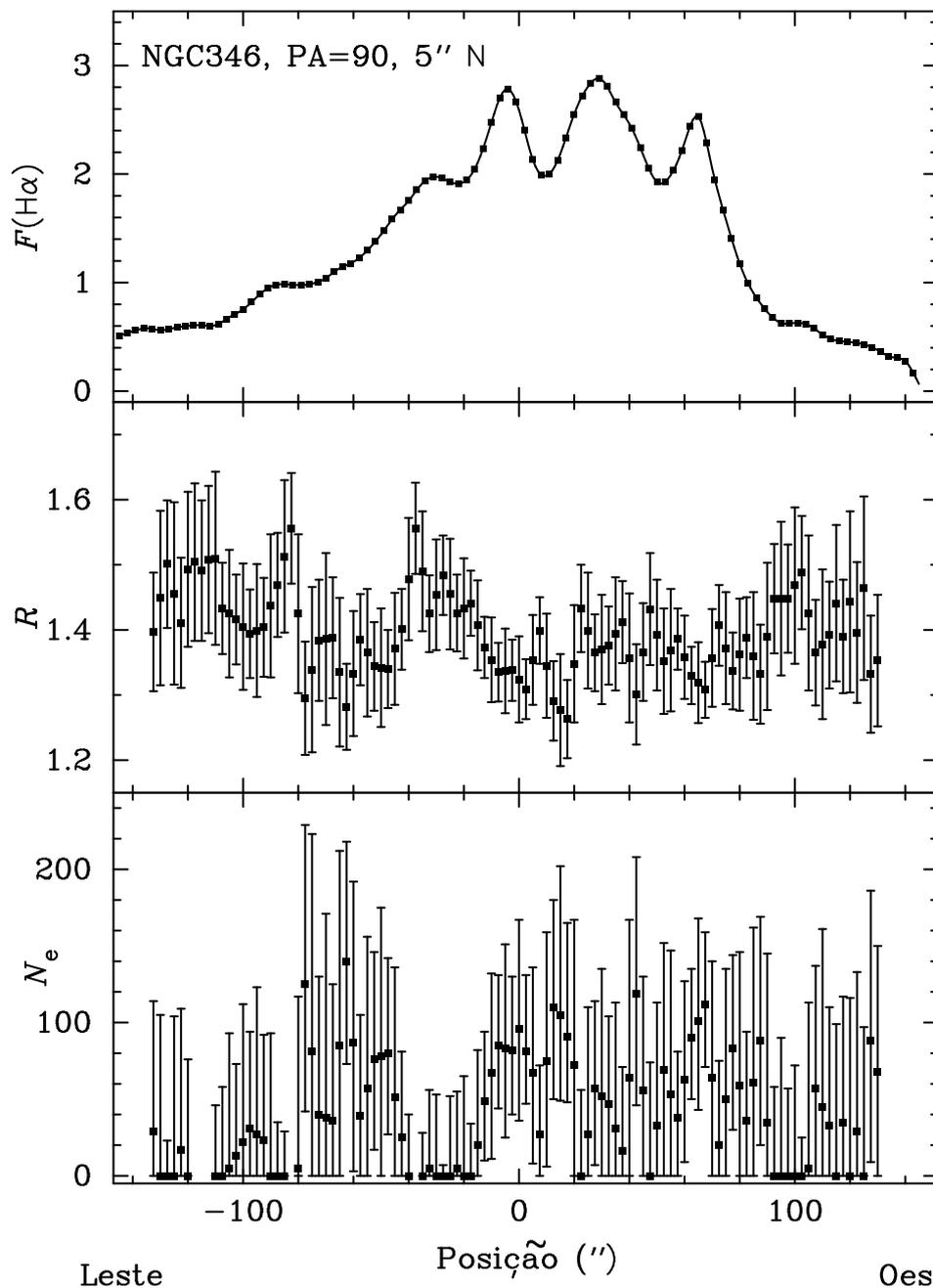


Figura 71 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 5''$ N. As posições são relativas ao centro da fenda.

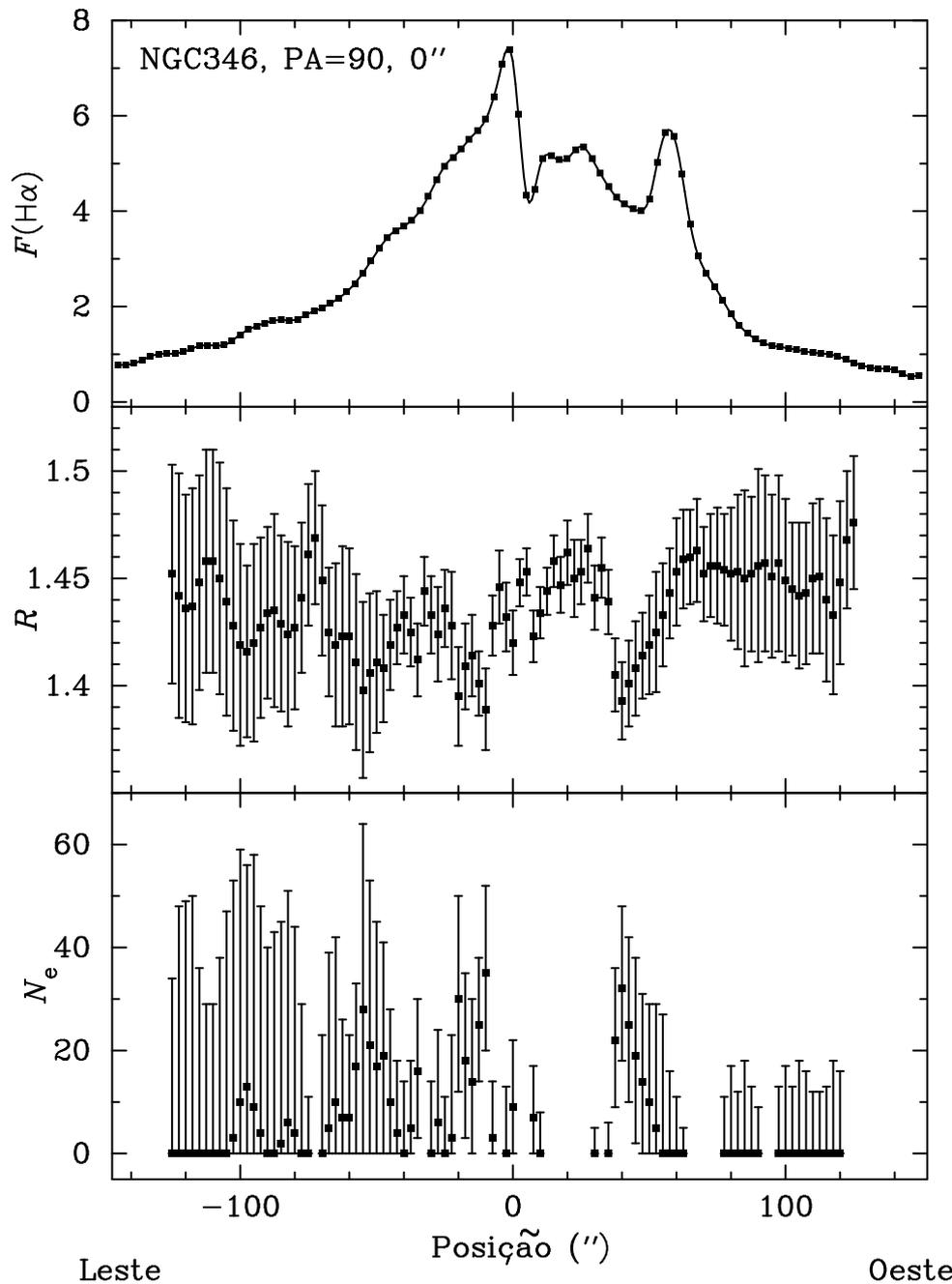


Figura 72 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 0''$. As posições são relativas ao centro da fenda.

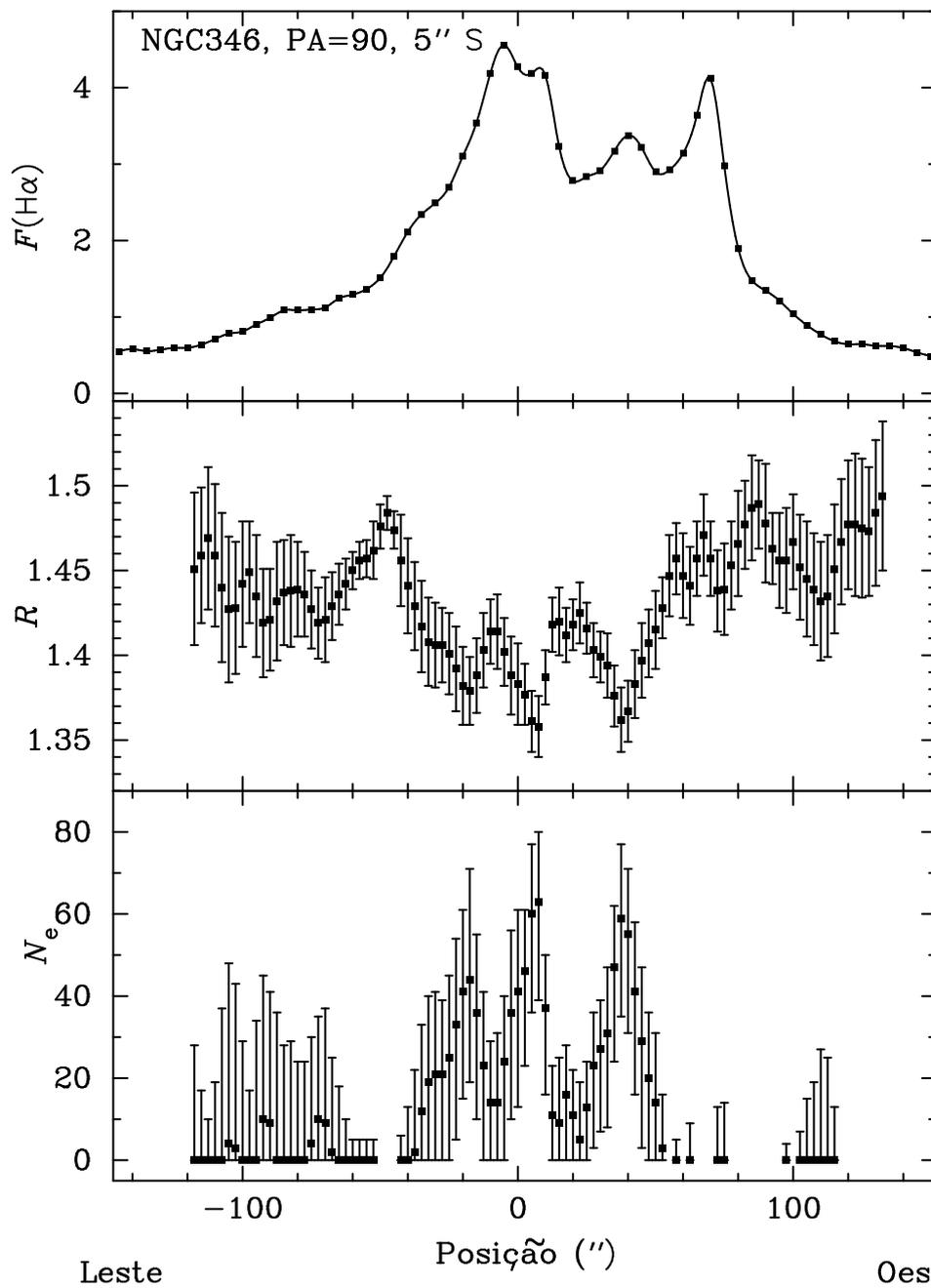


Figura 73 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 5''$ S. As posições são relativas ao centro da fenda.

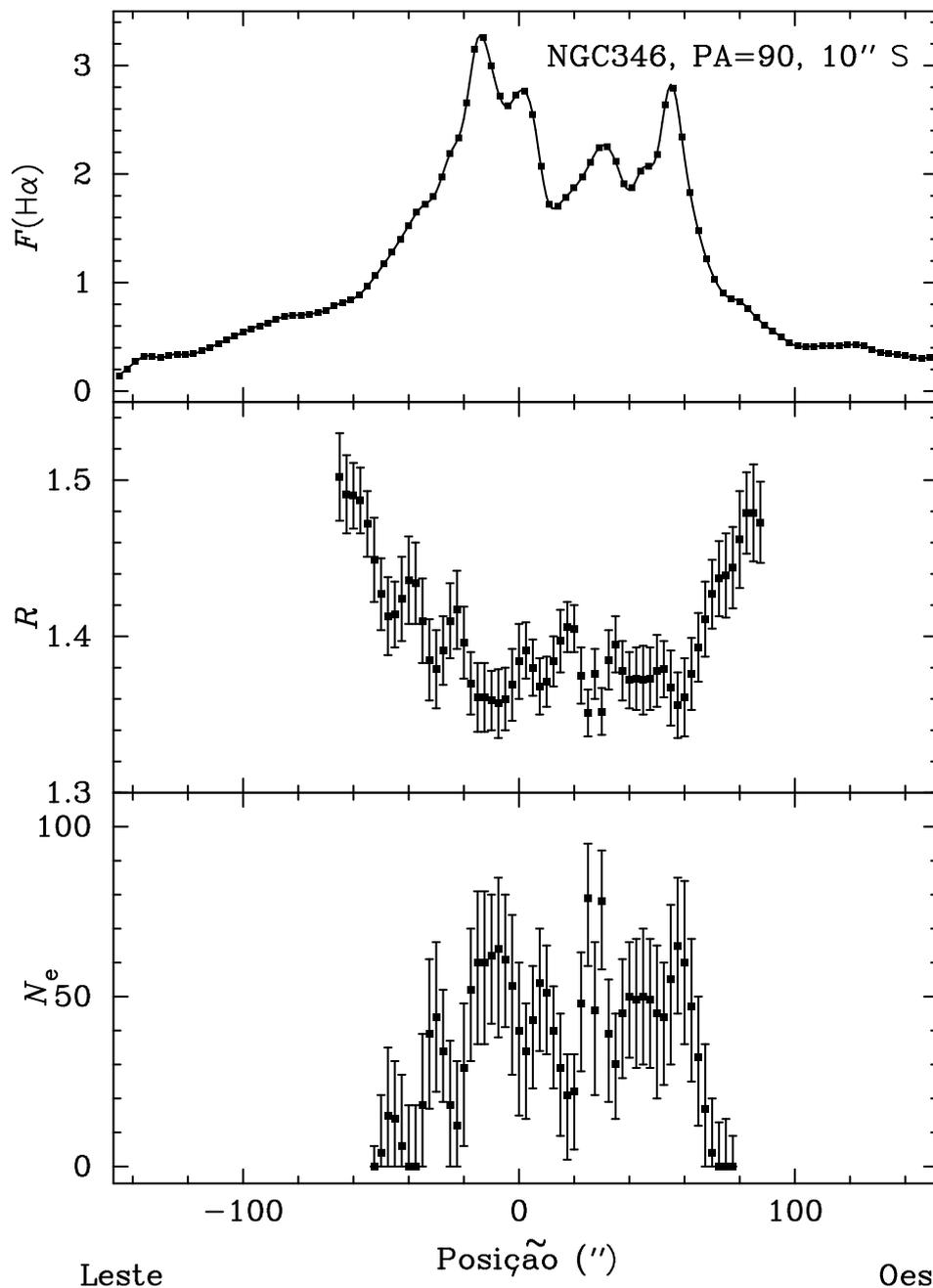


Figura 74 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 10''$ S. As posições são relativas ao centro da fenda.

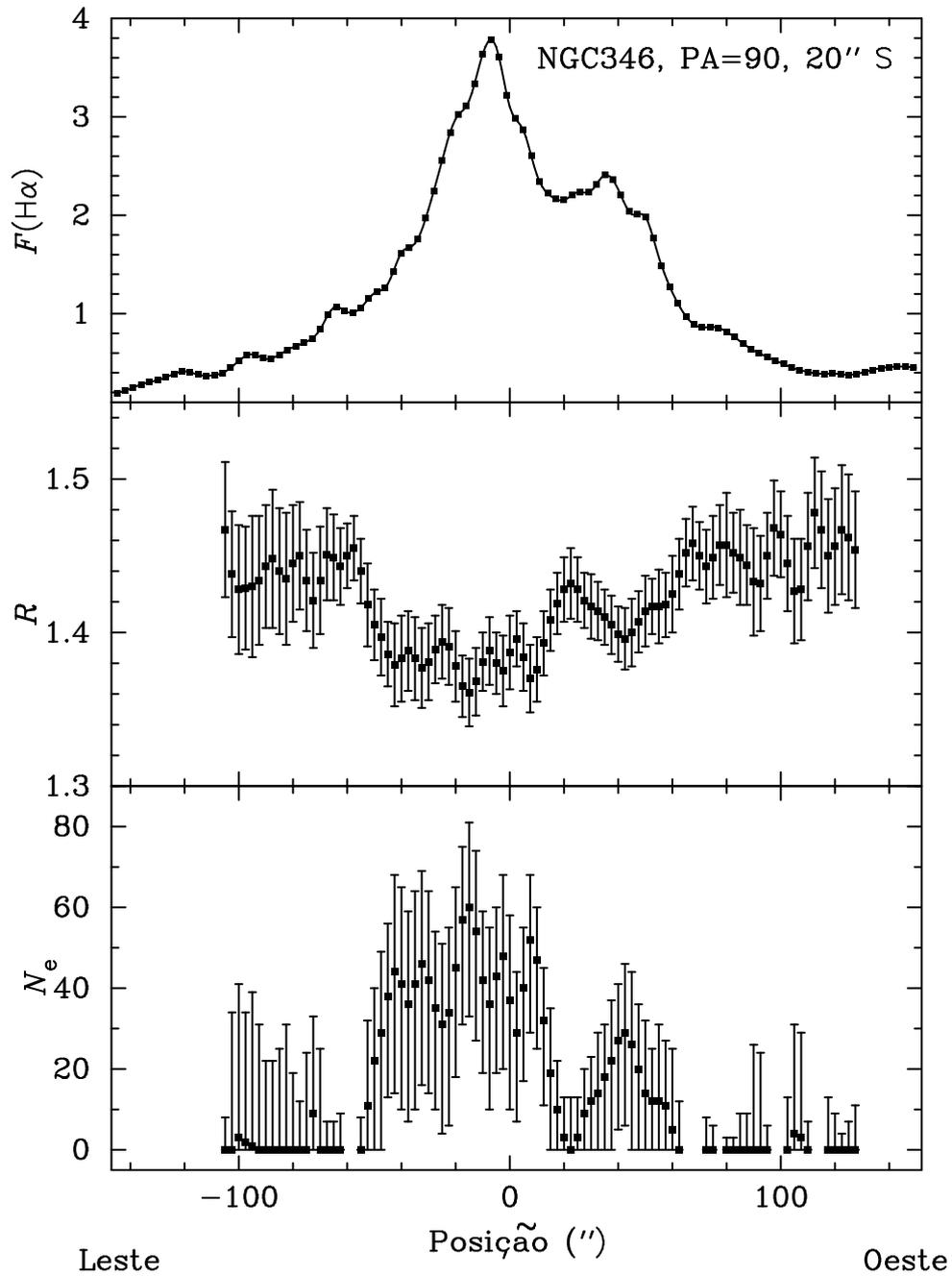


Figura 76 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S\text{ II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 20''$ S. As posições são relativas ao centro da fenda.

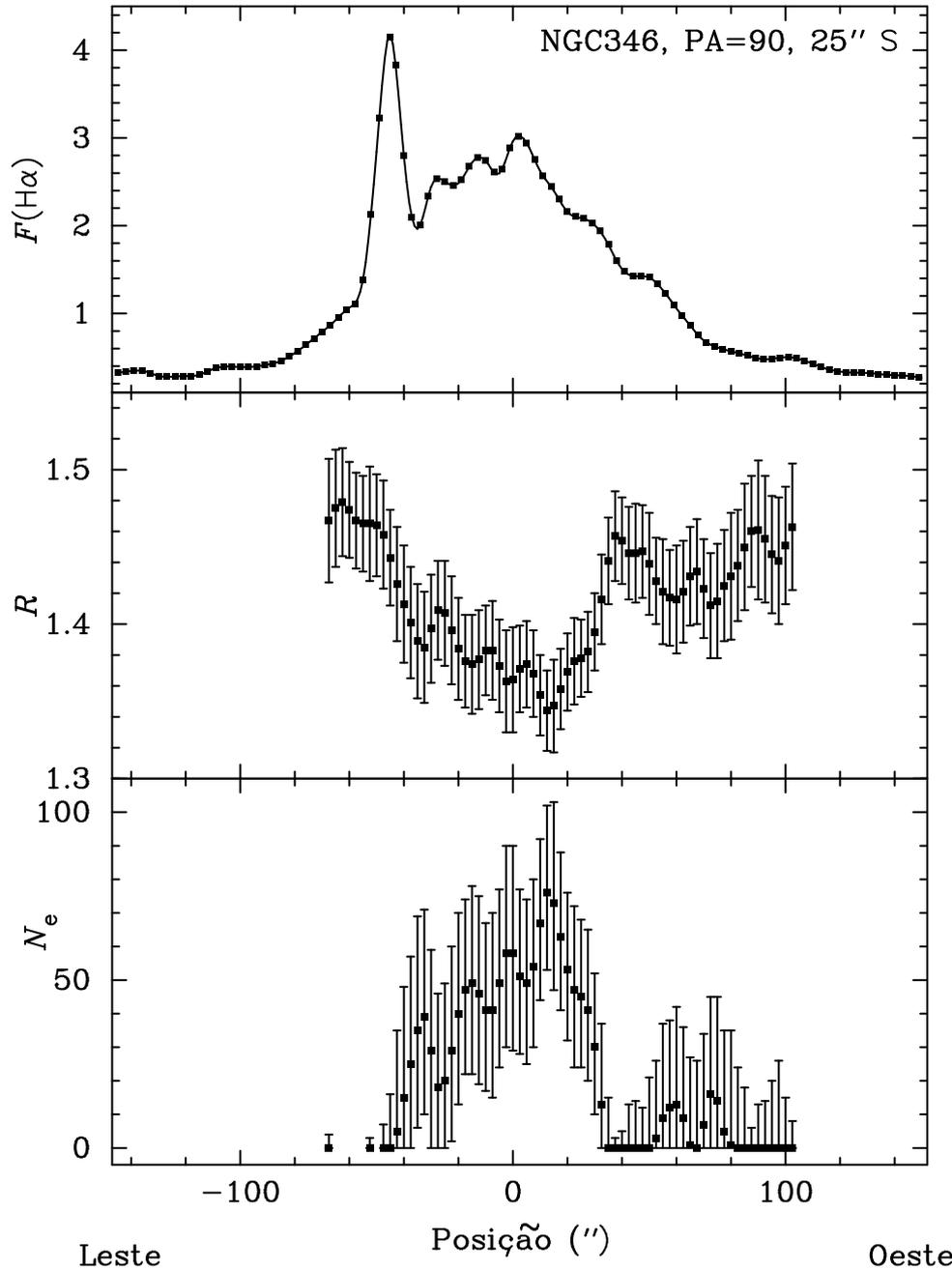


Figura 77 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S\text{ II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 25''$ S. As posições são relativas ao centro da fenda.

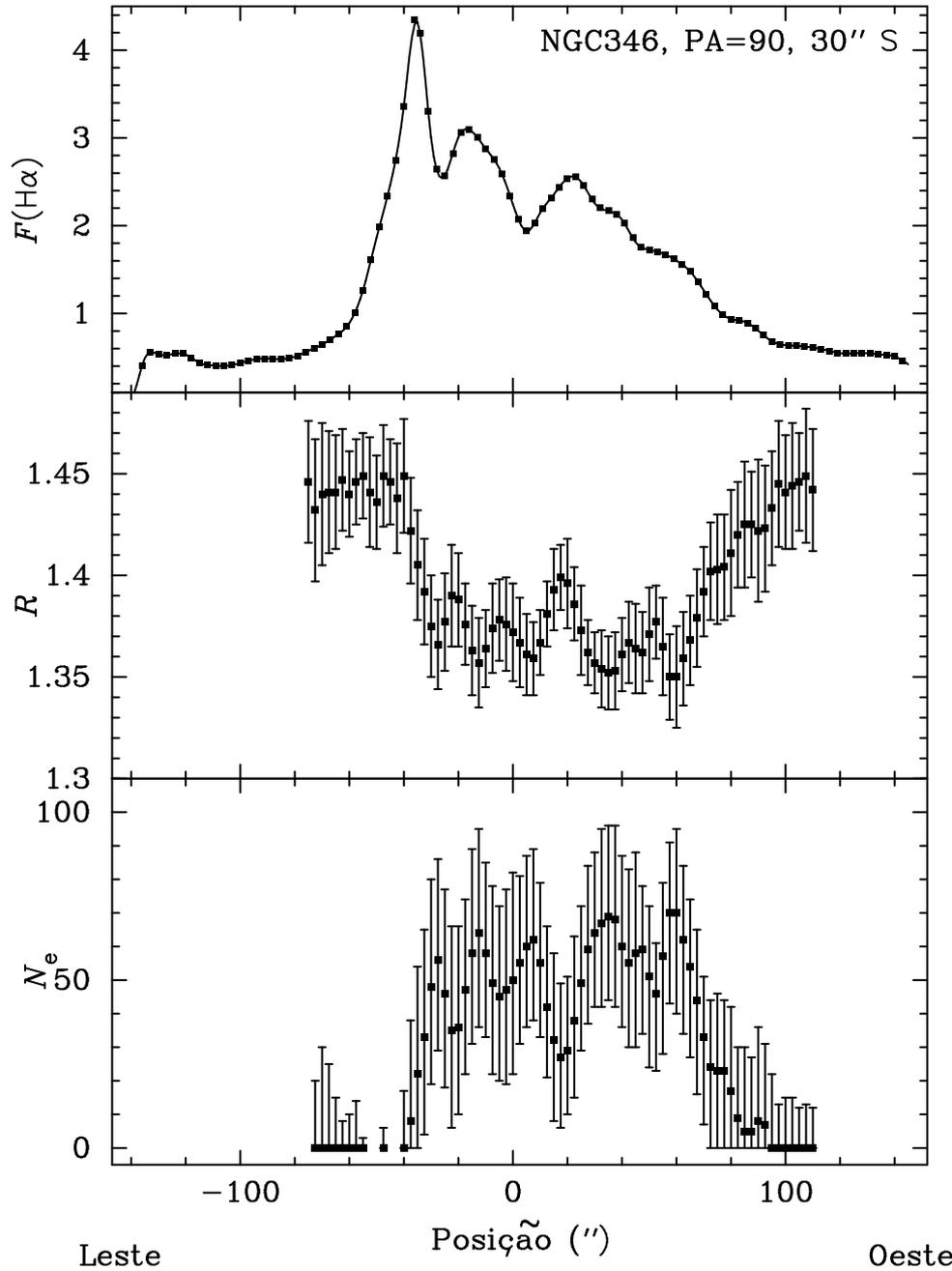


Figura 78 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S\text{ II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 30''$ S. As posições são relativas ao centro da fenda.

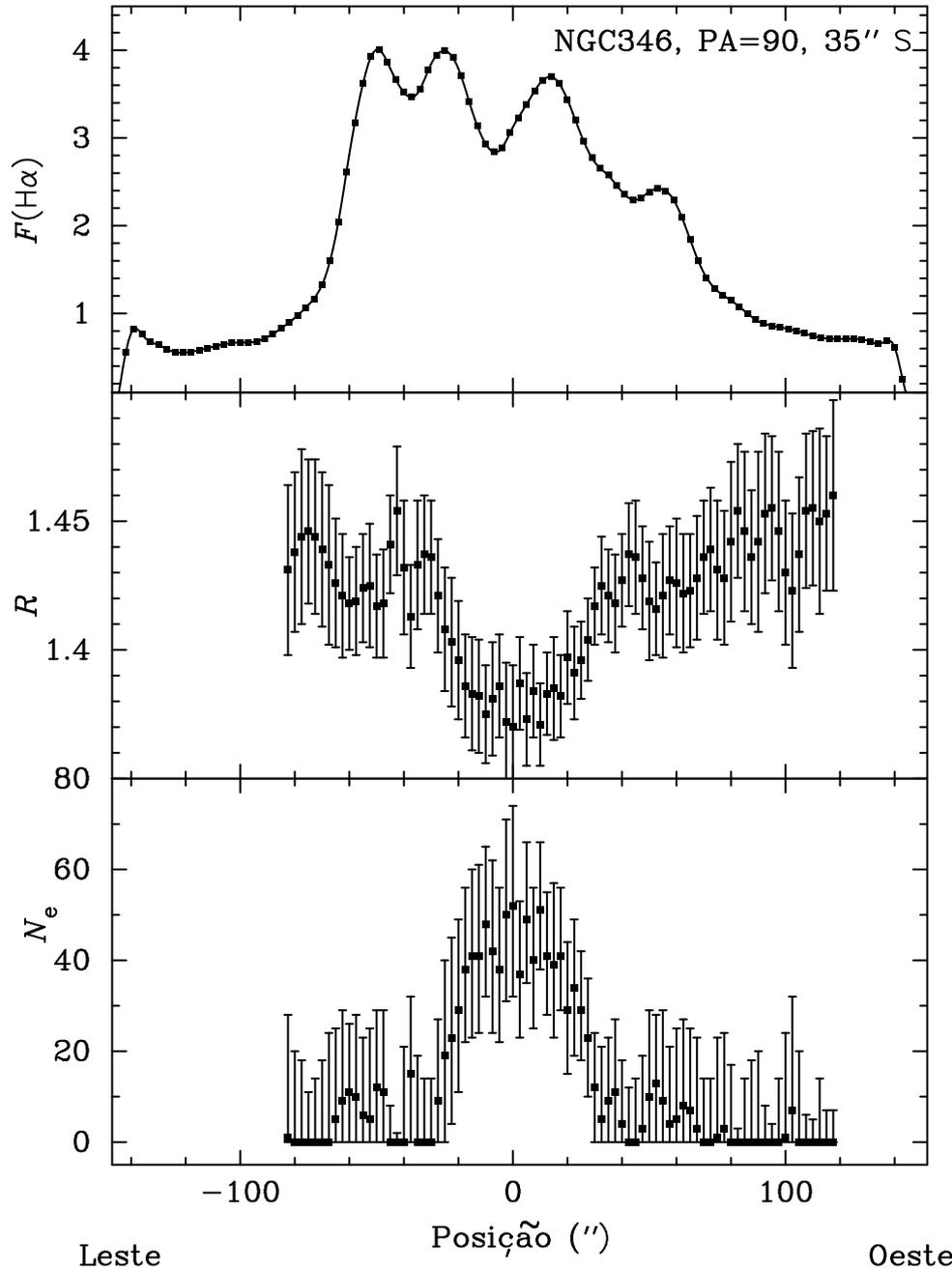


Figura 79 – Perfil espacial do fluxo em $H\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[S\text{ II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $PA = 90^\circ$, $\Delta\delta = 35''$ S. As posições são relativas ao centro da fenda.

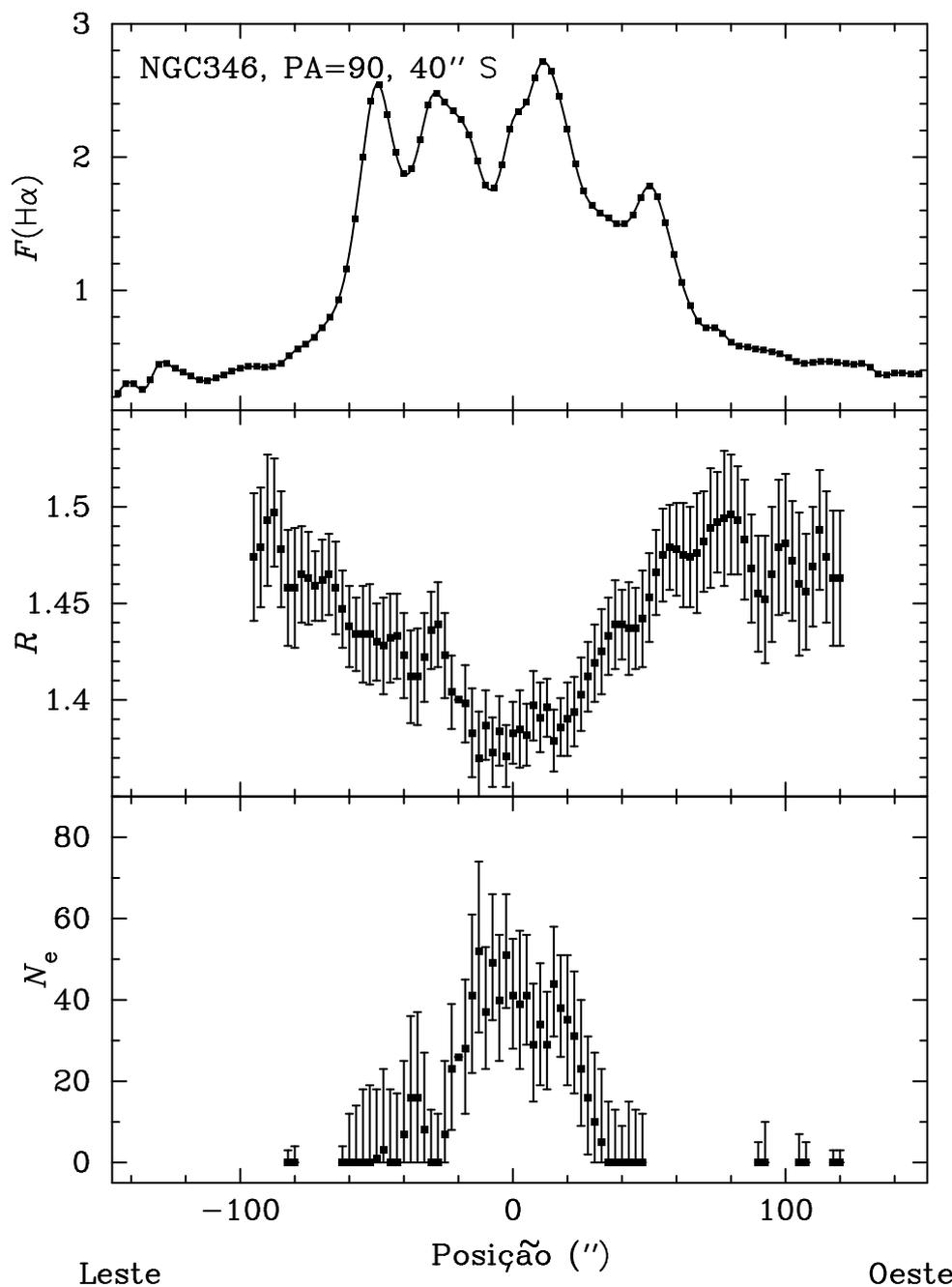


Figura 80 – Perfil espacial do fluxo em $\text{H}\alpha$ (10^{-14} ergs cm^{-2} s^{-1}), da razão de linhas de $[\text{S II}]\lambda 6717/\lambda 6731$ (R) e da densidade eletrônica (cm^{-3}) estimada em PNM: NGC 346 com posição de fenda de $\text{PA} = 90^\circ$, $\Delta\delta = 40''$ S. As posições são relativas ao centro da fenda.

No capítulo seguinte tem-se as conclusões do presente trabalho e algumas perspectivas futuras de estudo.

5 *Considerações Finais*

Utilizando espectroscopia de fenda longa com alto sinal ruído observou-se a região H II PNM: NGC 346. Foram obtidos 1020 espectros unidimensionais na região do vermelho (6000 a 7000 Å) referentes às posições sobre a nebulosa para a estimativa de densidade eletrônica via razão de linhas do [S II] e 2040 espectros unidimensionais para a estimativa de velocidade radial. Nas observações na faixa azul do ótico (4000 a 5000 Å) obteve-se 179 espectros unidimensionais referentes às posições sobre a nebulosa dos quais foram estimados a temperatura eletrônica (T_e) via razão de linhas do [O III].

Os valores estimados de temperatura eletrônica foram relativamente homogêneos, apresentando uma média ponderada por fluxo H β de 12 269 K e uma dispersão de 6,1% para todos os pontos medidos. Nas posições 0'' e 30'' N de PNM: NGC 346 foi observado um leve gradiente de $-5,7 \pm 1,3$ K arcsec $^{-1}$ na direção Leste-Oeste. Os resultados de T_e da região H II PNM: NGC 346 obtidos nesse estudo são semelhantes aos estimados por diversos autores da literatura, corroborando os resultados e conclusões obtidos no estudo de T_e para a região H II PNM: NGC 346.

Cerca de metade da variância de temperatura eletrônica é devido a erros de medida, o restante equivale a flutuações superficiais de temperatura de $t_s^2 \approx 0,0021$, correspondendo a uma dispersão de aproximadamente de 4,5%. Utilizando um modelo tridimensional, a estimativa de flutuação de temperatura eletrônica (t^2) foi de 0,0082.

Para as dezoito regiões H II pertencentes às Nuvens de Magalhães, 11 da Grande Nuvem e 7 da Pequena Nuvem de Magalhães, foram extraídos espectros unidimensionais na região do vermelho (6000 a 7000 Å). Medidas ponto-a-ponto das linhas do [S II] foram realizadas e a razão ($\lambda 6717/\lambda 6731$) destas foi utilizada como sensor de densidade eletrônica. De forma geral, as nebulosas apresentaram uma mediana de densidade eletrônica baixa, sendo menor que 100 cm $^{-3}$ para a maioria dos objetos. O pico de densidade eletrônica nos objetos também é evidenciado no intervalo inter-quartis, região representativa de 50% das medidas de densidade em cada nebulosa, que apresenta alta dispersão da mediana, chegando a mais de 100% para as maiores em tamanho angular.

Alguns perfis espaciais sugerem a existência de um gradiente de densidade eletrônica

o que pode indicar a existência de resultados interessantes, tais como o efeito champagne. Os perfis que apresetam tais características foram de 30 Doradus ($PA = 10^\circ$ e 24°) e GNM: N11 E. Uma queda abrupta na densidade eletrônica também sugere a existência de tal efeito, pois esta queda abrupta pode ser entendida pela ação de freamento do gás ionizado em seu movimento em direção a uma nuvem molecular. Esta ocorrência foi evidenciada nos perfis de 30 Doradus ($PA = 26^\circ$ e 10°), GNM: N4 A, GNM: N11 B, PNM: N81, PNM: N83 A,C (ambas posições) e PNM: N88 ($PA = 106^\circ$). Por sua vez, os perfis de GNM: N160 A (ambas posições) e SMC: N88 ($PA = 90^\circ$) apresentaram uma forma gaussiana, ou de sino, para a distribuição de densidade, sugerindo uma expansão livre do gás ionizado no meio interestelar.

Os valores recalculados de densidade eletrônica utilizando as razões de linha do [S II] $\lambda 6717/\lambda 6731$ indicados na literatura apresentaram grande concordância com os valores de densidade estimadas ponto-a-ponto sobre as diversas nebulosas da amostra.

5.1 Sugestões e perspectivas futuras

Estimativas de temperatura eletrônica em mais pontos sobre PNM: NGC 346 podem trazer mais informações sobre as flutuações de temperatura desse objeto, assim como uma estimativa mais ampla desta grandeza para regiões H II. A criação de mapas de temperatura eletrônica também pode ser importante instrumento na determinação das zonas de ionização em regiões H II, possibilitando uma melhoria dos modelos existentes para determinação de abundâncias químicas.

Estudos mais detalhados dos objetos que apresentaram um gradiente de densidade eletrônica ou ainda uma queda abrupta de densidade, podem gerar resultados promissores, especialmente para o maior entendimento das estruturas dinâmicas de nebulosas ionizadas. Um estudo interessante a ser realizado com estes objetos seria a construção de mapas de densidade e/ou velocidade radial, pois poderia evidenciar o efeito champagne, caso exista, e as estruturas internas dos objetos.

Referências

- ALLER, L.H.; FAULKNER, D.J. The Helium to Hydrogen ratio in the Small Magellanic Cloud **Publications of the Astronomy Society of the Pacific**, v. 74, p. 219-224, 1962.
- ALLER, L.H.; CZYZAK, S.J.; KEYES, C.D. *et al.* Chemical composition of nebulosities in the Magellanic Clouds **Proc. Nat. Acad. Sci. USA**, v. 71, p. 4496-4501, 1974.
- BEVINGTON, P.R. **Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences**. New York, NY : McGraw-Hill Book Company, 1969, p. 336.
- COPETTI, M.V.F.; DOTTORI, H.A. Global photometric observations of 30 H II regions in the Small Magellanic Cloud **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 77, p. 327-331, 1989.
- COPETTI, M.V.F. Global photometric observations and physical properties of H II regions in the Small Magellanic Cloud **Astrophysics and Space Science**, v. 156, p. 103-106, 1989.
- COPETTI, M.V.F. Physical properties of H II regions in the Small Magellanic Cloud **Astronomy and Astrophysics**, v. 229, p. 533-539, 1990.
- COPETTI, M.V.F.; WRITZL, B.C. Study of electron density in planetary nebulae. A comparison of different density indicators **Astronomy and Astrophysics**, v. 382, p. 282-290, 2002.
- COPETTI, M.V.F. Electron temperature fluctuations in H II regions. The feasibility of t^2 estimates from point-to-point observations **Astronomy & Astrophysics**, v. 453, p. 943-947, 2006.
- DAVIES, R.D.; ELLIOTT, K.H.; MEABURN, J. The nebular complexes of the large and small Magellanic Clouds **Monthly Notes Royal Astronomy Society**, v. 81, p. 89-128, 1976.
- DICKEL, H.R.; ALLER, L.H.; FAULKNER, D.J. Photoelectric spectrophotometry of emission nebulosities in the Magellanic Clouds **International Astronomical Union Supplement**, v. 20, p. 294-310, 1964.
- DUFOUR, R.J. The chemical composition of selected H II regions in the Magellanic Clouds **The Astrophysical Journal**, v. 195, p. 315-332, 1975.

DUFOUR, R.J.; HARLOW, W.V. Abundances in 10 H II regions in the Small Magellanic Cloud **The Astrophysical Journal**, v. 216, p. 706-712, 1977.

DUFOUR, R.J.; KILLEN, R.M. The chemical composition of three planetary nebulae in the Magellanic Clouds **The Astrophysical Journal**, v. 211, p. 68-76, 1977.

DUFOUR, R.J.; SHIELDS, G.A.; TALBOT Jr., R.J. The carbon abundance in the Magellanic Clouds from IUE observations of H II regions **The Astrophysical Journal**, v. 252, p. 461-473, 1982.

ESTEBAN, C.; PEIMBERT, M.; TORRES-PEIMBERT, S. *et al.* Chemical composition of the Orion nebula derived from echelle spectrophotometry **Monthly Notes Royal Astronomy Society**, v. 295, p. 401-422, 1998.

ESTEBAN, C.; PEIMBERT, M.; TORRES-PEIMBERT, S. *et al.* Faint emission lines and temperature fluctuations in M8 **The Astrophysical Journal, Supplement**, v. 120, p. 113-1219, 1999.

ESTEBAN, C.; PEIMBERT, M.; TORRES-PEIMBERT, S. *et al.* Chemical composition and temperature fluctuations in M 17 **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica**, v. 35, p. 65-83, 1999.

ESTEBAN, C. Are Temperature fluctuations out there? **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica**, v. 12, p. 56-61, 2002.

FERLAND, G.J. Physical Conditions in the Orion Nebula H II Region **Publications of the Astronomy Society of the Pacific**, v. 113, p. 41-48, 2001.

GARNETT, D.R.; DINERSTEIN, H.L. Spatially resolved [O II] recombination line observations of the Ring Nebula, NGC 6720 **The Astrophysical Journal**, v. 558, p. 145-156, 2001.

GRUENWALD, R.; VIEGAS, S.M. Line-of-sight results from H II regions models. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 78, p. 153-178, 1992.

GRUENWALD, R.; VIEGAS, S.M. Temperature fluctuations in planetary nebulae. **Astronomy & Astrophysics**, v. 303, p. 535-540, 1995.

GONZALEZ-DELGADO, R.M.; ROSA M.; PEREZ, E. *et al.* Violent star formation in NGC 2363 **The Astrophysical Journal**, v. 437, p. 239-261, 1994.

HENIZE, K.G. Catalogues of H α -emission stars and nebulae in the Magellanic Clouds. **Astrophysics Journal Supplement**, v. 2, p. 315-358, 1956.

HEYDARI-MALAYERI, M.; TESTOR, G. Detection and study of two H II blobs in the LMC giant H II region N 160 and investigation of their nebular and stellar environment **Astronomy & Astrophysics**, v. 162, p. 180-198, 1986.

HEYDARI-MALAYERI, M.; NIEMELA, V.S.; TESTOR, G. The LMC H II regions N11C and E and their stellar contents **Astronomy & Astrophysics**, v. 184, p. 300-314, 1987.

HEYDARI-MALAYERI, M.; Le BERTRE, T.; MARGAIN, P. The SMC Compact Blob N81: a detailed multi-wavelength investigation **Astronomy & Astrophysics**, v. 195, p. 230-244, 1988.

HEYDARI-MALAYERI, M.; LECAVELIER des ETANGS, A. The LMC H II region N4A and its unusual molecular cloud **Astronomy & Astrophysics**, v. 291, p. 960-974, 1994.

HILDITCH, R.W.; HOWARTH, L.D.; HARRIES, T.J. Forty eclipsing binaries in the Small Magellanic Cloud: fundamental parameters and Cloud distance **Monthly Notices Royal Astronomy Society**, v. 357, p. 304-324, 2005.

ISRAEL, F.P. Radio observations of H II regions in external galaxies. III - Thermal emission, H II regions and star formation in 14 late-type galaxies **Astronomy & Astrophysics**, v. 90, p. 246-268, 1980.

KENNICUTT, R.C.Jr. Structural properties of giant H II regions in nearby galaxies **The Astrophysical Journal**, v. 287, p. 116-130, 1984.

KINGDON, J. B.; FERLAND, G. J. Temperature fluctuations in photoionized nebulae **The Astrophysical Journal**, v. 450, p. 691-704, 1995.

KRABBE, A.C.; COPETTI, M.V.F. Electron temperature fluctuations in 30 Doradus **Astronomy & Astrophysics**, v. 387, p. 295-300, 2002.

KRABBE, A.C.; COPETTI, M.V.F. Electron temperature fluctuations in planetary nebulae **Astronomy & Astrophysics**, v. 443, p. 981-994, 2005.

Kurt, C. M. & Dufour, R. J. The chemical composition of H II regions in the Magellanic Clouds: new calculations using modern atomic data **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, Serie de Conferencias**, v. 7, p. 202-206, 1998.

LIU, X.-W. Temperature fluctuations and chemical homogeneity in the planetary nebula NGC 4361 **Monthly Notes Royal Astronomy Society**, v. 295, p. 699-710, 1998.

LIU, X.-W. Optical recombination lines and temperature fluctuations **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica**, v. 12, p. 70-76, 2002.

LURIDIANA, V.; PEIMBERT, M.; LEITHERER, C. Photoionization models of NGC 2363 and their implications for the ionizing star cluster **The Astrophysical Journal**, v. 527, p. 110-124, 1999.

MARTIN, N. F.; IBATA, R. A.; BELLAZZINI, M.; IRWIN, M. J.; LEWIS, G. F. & DEHNEN, W. A dwarf galaxy remnant in Canis Major: the fossil of an in-plane accretion on to the Milky Way **Monthly Notes Royal Astronomy Society**, v. 348, p. 12-23, 2004.

MASSEY, P.; PARKER, J.W.; GARMANY, C.D. The stellar content of NGC 346 - A plethora of O stars in the SMC **The Astronomical Journal**, v. 98, p. 1305-1347, 1989.

- MATHEWSON, D.S.; FORD, V.L.; DOPITA, M.A. *et al.* Supernova remnants in the Magellanic Clouds **The Astrophysical Journal, Supplement**, v. 51, p. 345-355, 1983.
- MILLS, B.Y.; LITTLE, A.G.; DURDIN, J.M. *et al.* Supernova remnant candidates in the Small Magellanic Cloud **Monthly Notes Royal Astronomy Society**, v. 200, p. 1007-1017, 1982.
- NAZÉ, Y.; MANFROID, J.; STEVENS, I.R. *et al.* An X-ray investigation of the NGC 346 field in the Small Magellanic Cloud. III. XMM-Newton data **The Astrophysical Journal**, v. 608, p. 208-219, 2004.
- NIEMELA, V.S; MARRACO, H.G.; CABANNE, M.L. The young open cluster NGC 346 in the Small Magellanic Cloud **Publications of the Astronomy Society of the Pacific**, v. 98, p. 1133-1139, 1986.
- OLIVEIRA, V. A., COPETTI, M. V. F. & KRABBE, A. C. Electron temperature fluctuations in NGC 346 **Astronomy & Astrophysics**, v. 492, p. 463-468, 2008.
- OSTERBROCK, D.E. **Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei**. Mill Valey, CA : University Science Books, 1989, p. 408.
- PAGEL, B.E.J.; EDMUNDS, M.G.; FOSBURY, R.A.E. *et al.* A survey of chemical compositions of H II regions in the Magellanic Clouds **Monthly Notes Royal Astronomy Society**, v. 184, p. 569-592, 1978.
- PANAGIA, N.; GILMOZZI, R.; MACCHETTO, F. *et al.* Properties of the SN 1987A circumstellar ring and the distance to the Large Magellanic Cloud **The Astrophysical Journal**, 380 : L23-L26, 1991.
- PEIMBERT, M. Temperature determinations of H II regions **The Astrophysical Journal**, v. 150, p. 825-835, 1967.
- PEIMBERT, M.; TORRES-PEIMBERT, S. Chemical composition of H II regions in the Large Magellanic Cloud and its cosmological implications **The Astrophysical Journal**, v. 193, p. 327-333, 1974.
- PEIMBERT, M.; TORRES-PEIMBERT, S. Chemical composition of H II regions in the Small Magellanic Cloud and the pregalactic helium abundance **The Astrophysical Journal**, v. 203, p. 581-586, 1976.
- PEIMBERT, M.; PEIMBERT, A.; RUIZ, M.T. The chemical composition of the Small Magellanic Cloud H II region NGC 346 and the primordial Helium abundance **The Astrophysical Journal**, v. 541, p. 688-700, 2000.
- PREVOT, M.L.; LEQUEUX, J.; PREVOT, L. *et al.* The typical interstellar extinction in the Small Magellanic Cloud **Astronomy & Astrophysics**, v. 132, p. 389-392, 1984.
- TENORIO-TAGLE, G. The gas dynamics of H II regions. I - The champagne model **Astronomy & Astrophysics**, v. 71, p. 59-65, 1979.

TSAMIS, Y.G.; BARLOW, M.J.; LIU, X.-W *et al.* Heavy elements in Galactic and Magellanic Cloud HII regions: recombination-line versus forbidden-line abundances **Monthly Notes Royal Astronomy Society**, v. 338, p. 687-710, 2003.

SEWARD, F.D.; MITCHELL, M. X-ray survey of the Small Magellanic Cloud **The Astrophysical Journal**, v. 243, p. 736-743, 1981.

VERMEIJ, R.; DAMOUR, F.; VAN DER HULST, J.M.; BALUTEAU, J-P. The physical structure of Magellanic Cloud HII regions, Dataset **Astronomy & Astrophysics**, v. 390, p. 649-665, 2002.

VERMEIJ, R.; DAMOUR, F.; VAN DER HULST, J.M. The physical structure of Magellanic Cloud HII regions, Elemental abundances **Astronomy & Astrophysics**, v. 391, p. 1081-1095, 2002.

WALBORN, N.R. Spectral classification of O and B0 supergiants in the Magellanic Clouds **The Astrophysical Journal**, v. 215, p. 53-61, 1977.

WALBORN, N.R. A very early O star in the Small Magellanic Cloud **The Astrophysical Journal**, v. 224, p. L133-L135, 1978.

WALBORN, N.R.; BLADES, J.C. An O3 star in the Small Magellanic Cloud HII region NGC 346 **The Astrophysical Journal**, v. 304, p. L17-L19, 1986.

WALBORN, N.R.; LENNON, D.J.; HEAP, S.R. *et al.* The ultraviolet and optical spectra of metal-deficient O stars in the Small Magellanic Cloud **Publications of the Astronomy Society of the Pacific**, v. 112, p. 1243-1261, 2000.

WALTER, D.K.; DUFOUR, R.J.; HESTER, J.J. CNO abundances and temperature fluctuations in the Orion Nebula **The Astrophysical Journal**, v. 397, p. 196-213, 1992.

WILCOTS, E.M. Classical HII Regions in the Magellanic Clouds. I. Physical Properties **The Astronomical Journal**, v. 107, p. 1338-1363, 1994.

APÊNDICE A – Regressão Linear Ponderada

Esse apêndice apresenta as principais fórmulas e deduções utilizadas na análise de regressão ponderada realizada nesse trabalho.

A.1 Média e desvio padrão ponderados

Tendo a quantidade total de N medidas com valor individual x_i e cada uma das medidas com um peso estatístico w_i , sendo i variando de 1 a N , obtém-se a média ponderada das medidas pela equação¹

$$\bar{x} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i}. \quad (\text{A.1})$$

De forma direta, o desvio padrão da média (σ) pode ser ponderado por meio da equação

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum w_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum w_i} \frac{N}{N-1}}. \quad (\text{A.2})$$

Em algumas situações pode ser útil estimar a média ponderada das medidas ao quadrado (x_i^2), elevando-se à segunda potência o termo x_i da equação A.1, resultando em

$$\bar{x}^2 = \frac{\sum w_i x_i^2}{\sum w_i}. \quad (\text{A.3})$$

¹Para não sobrecarregar a notação omitiu-se os limites do somatório das equações.

A.2 Regressão linear ponderada

Partindo de uma distribuição de medidas (x_i, y_i) sobre um plano cartesiano, é possível estabelecer uma regressão linear, onde um modelo é adotado para ajustar uma função à distribuição. Uma interpretação comum, porém errônea, sobre regressão linear é que esta é obrigatoriamente realizada por uma reta. Porém, o termo “linear” significa que os coeficientes a serem determinados no modelo (graus de liberdade) podem ser encontrados utilizando um sistema linear. Apenas por mera coincidência, o modelo adotado aqui é realmente uma reta, cuja análise de regressão é utilizada para ajustar os coeficientes de uma reta dada por

$$y = a + bx, \quad (\text{A.4})$$

sendo:

b = coeficiente angular (inclinação da reta);

a = coeficiente linear (ponto que a reta cruza o eixo vertical).

Todavia, quando o procedimento de ajuste da regressão introduz tendências nos coeficientes estimados (heterogeneidade de variância) o erro do ajuste tende a ser superestimado. Para diminuir esse erro, é usual a transformação do modelo heterogêneo em homogêneo, com o uso da função logarítmica sobre os dados, ou da regressão ponderada.

Analisando apenas a situação ponderada, que é o caso de interesse para este trabalho, com N sendo a quantidade de medidas e w_i o peso estatístico, pode-se definir as grandezas

$$S_{XX} = \frac{N \sum w_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum w_i}, \quad (\text{A.5})$$

sendo :

S_{XX} = variância da medida x_i ;

\bar{x} = média ponderada de x_i .

$$S_{YY} = \frac{N \sum w_i (y_i - \bar{y})^2}{\sum w_i}, \quad (\text{A.6})$$

sendo :

S_{YY} = variância da medida y_i ;

\bar{y} = média ponderada de y_i .

$$S_{XY} = \frac{N \sum w_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum w_i}, \quad (\text{A.7})$$

sendo :

S_{XY} = variância da correlação entre as medidas x_i e y_i ;

\bar{x} = média ponderada de x_i ;

\bar{y} = média ponderada de y_i .

$$S^2 = \frac{N}{N-2} \frac{\sum w_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum w_i}, \quad (\text{A.8})$$

sendo :

S^2 = variância total das medidas;

\hat{y} = valor estimado pela reta de regressão.

Da equação A.8 tem-se que a variância total das medidas é proporcional ao resíduo, isto é, a diferença entre o valor medido (y_i) e o valor estimado pela reta de regressão (\hat{y}). O coeficiente angular da reta de regressão (b) e seu respectivo erro (σ_b) são calculados por

$$b = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}, \quad (\text{A.9})$$

$$\sigma_b = \frac{S}{\sqrt{S_{XX}}}. \quad (\text{A.10})$$

Tendo estimado o coeficiente angular e as médias ponderadas para as medidas, calcula-se o coeficiente linear e seu respectivo erro com

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad (\text{A.11})$$

$$\sigma_a = S \sqrt{\frac{\bar{x}^2}{S_{XX}}}. \quad (\text{A.12})$$

A regressão linear ponderada dos dados deste trabalho foram obtidos utilizando as equações A.9 – A.12. É interessante notar que as deduções acima se reduzem ao caso não ponderado se o peso estatístico w_i for substituído por uma constante qualquer (por exemplo 2) em todas as equações.

A.2.1 Coeficiente de correlação e intervalo de previsão

Uma maneira de se estimar o grau de correlação entre as variáveis observadas é por meio do coeficiente de correlação (R^2) dado pela equação

$$R^2 = \frac{S_{XY}^2}{S_{XX}S_{YY}}. \quad (\text{A.13})$$

Tendo R^2 valores possíveis entre 0 e 1. Quanto mais próximo da unidade for o valor de R^2 , maior será a correlação entre as variáveis. O oposto também é válido, um R^2 próximo a zero indica uma correlação nula, ou praticamente nula. Por exemplo, tendo-se $R^2 = 0,7814$ significa que aproximadamente 78% das alterações sofridas por uma variável do sistema é devido exclusivamente às alterações da outra, indicando grande dependência entre elas. Por outro lado, $R^2 = 0,014$ significa uma dependência de apenas 1,4% entre as variáveis observadas.

Define-se o intervalo de confiança como a faixa onde é possível traçar uma reta que ainda seja capaz de representar os dados de interesse dentro de uma probabilidade de interesse. Pode-se estimar tal intervalo de previsão utilizando a relação

$$b \pm t_{\alpha/2} \sigma_b, \quad (\text{A.14})$$

sendo:

b = coeficiente angular da reta de ajuste;

σ_b = erro do coeficiente angular;

$t_{\alpha/2}$ = variável aleatória com distribuição t bilateral;

$\alpha/2$ = erro pretendido na análise.

Realizando-se N medidas e tendo-se $(N - 1)$ graus de liberdade, os valores possíveis de $t_{\alpha/2}$ são tabelados e estão relacionados com os valores calculados pela análise, conforme confiabilidade desejada no ajuste. Dessa forma, nas tabelas de distribuição t de Student, procura-se o grau de liberdade e $\alpha/2$ para se obter o valor de t , sendo que para uma confiabilidade de 95% tem-se um $\alpha/2 = 0,05$, na configuração bilateral. A distribuição t de Student tende à distribuição normal para valores elevados de medidas.

Uma verificação empírica da existência de correlação entre os dados é verificar a ocorrência de alteração no sinal do coeficiente angular da reta de regressão ao se realizar a subtração σ_b de b (Equação A.14), caso não ocorra troca de sinal do coeficiente angular da reta de ajuste, o modelo de regressão representa bem os dados. Por exemplo, para o caso específico das temperaturas eletrônicas para a posição $+30''$ de NGC 346, com 64

medidas (63 graus de liberdade), adotando-se uma confiabilidade de 95% tem-se que $t_{\alpha/2}$ é igual a 1,998, valor retirado da tabela de Student. Sendo o coeficiente angular b de $-5,61$, calculado por meio da equação A.14, tem-se que b está no intervalo de $-3,51$ a $-7,71$, isto é, não ocorre a inversão da reta (troca do sinal de b) evidenciando uma correlação, mesmo que suave. O valor estimado para R^2 (0,318) confirma a análise empírica preliminar. Uma confiabilidade de 95% significa que existe uma probabilidade de 5% dos dados estarem fora do ajuste desejado.

A.2.2 Faixas dos intervalos de confiança e previsão

Uma análise complementar e mais detalhada pode ser feita para verificar o ajuste da curva de regressão. Na verdade, para uma análise gráfica, os intervalos de confiança e de previsão são de grande auxílio visual da regressão e da previsão de valores. Pode-se destacar duas faixas de maior interesse: (1) o intervalo de confiança, indicando os valores máximos e mínimos possíveis quando se utiliza a regressão linear, representando as possíveis inclinações de retas que ainda correponderiam a um modelo de regressão válido para a distribuição estudada, e (2) o intervalo de previsão representa a região no gráfico que contém a maior parte dos pontos medidos e os previstos. Ambas são dependentes do grau de confiança aplicado.

Para traçar o intervalo de confiança, que depende diretamente do erro de ajuste da reta de regressão, isto é, do coeficiente angular e linear, pode-se utilizar

$$Y = \hat{y} \pm t_{\alpha/2} S \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_{XX}}}, \quad (\text{A.15})$$

sendo:

S = desvio padrão total das medidas;

Y = posição no eixo vertical devido à x .

Para o intervalo de previsão, que além do erro de ajuste da reta de regressão, considera-se o das medidas

$$Y = \hat{y} \pm t_{\alpha/2} S \sqrt{\frac{\sum w_i}{N w_i} + \frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_{XX}}}. \quad (\text{A.16})$$

A.2.3 Exemplo

A figura 81 apresenta as temperatura eletrônica e seus respectivos erros, assim como os intervalos de confiança e previsão.

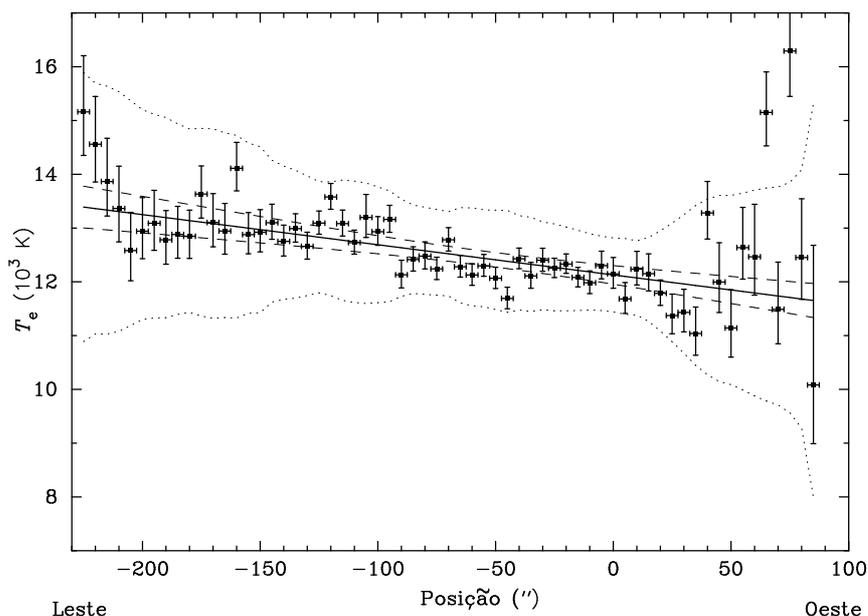


Figura 81 – Regressão Linear na posição 30'' N sobre PNM: NGC 346, apresentando as faixas de confiança e previsão.

A figura 81 tem função ilustrativa do método de regressão linear ponderada. Foram utilizados os dados de fluxo da linha em $H\beta$ e temperatura eletrônica referentes à posição 30'' N sobre a região H II PNM: NGC 346. A linha contínua é a reta de regressão estimada, cujo modelo adotado foi $y = a + bx$, sendo b igual a $-5,61 \pm 1,05 \text{ K arcsec}^{-1}$ e a igual a $12129 \pm 86 \text{ K}$, com R^2 de 0,318. Então, o gradiente encontrado foi decrescente, valor negativo para b , com R^2 mediano próximo a 0,5. O intervalo de confiança (Equação A.15) está representado pela linha tracejada e o intervalo de previsão (Equação A.16) pela linha pontilhada, ambos, para $p \leq 0,05$ (95% de confiança).

A escolha pela posição 30'' para o Norte da estrela de referência foi pelo fato que nessa posição foi encontrado o gradiente de temperatura mais representativo, dentre as três posições que o estudo foi realizado para a região H II PNM: NGC 346.

No apêndice seguinte é apresentado todos os valores medidos e calculados para a posição 0'' de PNM: NGC 346, fornecendo uma idéia geral e representativa dos valores ponto-a-ponto estimados nesse trabalho.

APÊNDICE B – Imagens em Cores de Algumas Nebulosas Observadas

Imagens originadas de combinação de diversas outras, observadas em filtros diferentes, também conhecidas como imagens em cor falsa, são úteis para uma melhor identificação dos objetos astronômicos de interesse. Nebulosas ionizadas, em especial, resultam em imagens de alta beleza estética. Aqui, tem-se uma lista destas imagens para algumas das regiões H II observadas neste trabalho. Como função secundária, uma imagem em cor falsa, algumas vezes, evidencia alguma estrutura interna do objeto. Facilitando, assim, a localização dos efeitos observados nos mapas superficiais e nos perfis espaciais. Infelizmente nem todos os alvos escolhidos possuem estes mosaicos, sendo geralmente encontrados apenas para os de maiores tamanhos angulares ou de brilho intenso no ótico e/ou raios-X.

Inicialmente tem-se uma imagem da região H II NGC 346, alvo do estudo mais detalhado deste trabalho, onde os principais resultados se encontram no capítulo 4. Posteriormente são apresentados os demais objetos estudados na mesma ordem em que apareceram em todo o trabalho, elementos da GNM seguidos pelos da PNM.



Figura 82 – Imagem em cor falsa da região HII PNM: NGC 346, observada e tratada em julho de 2004 pela equipe científica do STSCI, chefiada por A. Nota, utilizando a *Advanced Camera for Surveys* acoplada ao telescópio espacial Hubble, NASA. Disponível em <<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2005/35/>>. Acesso em 15/07/2008.

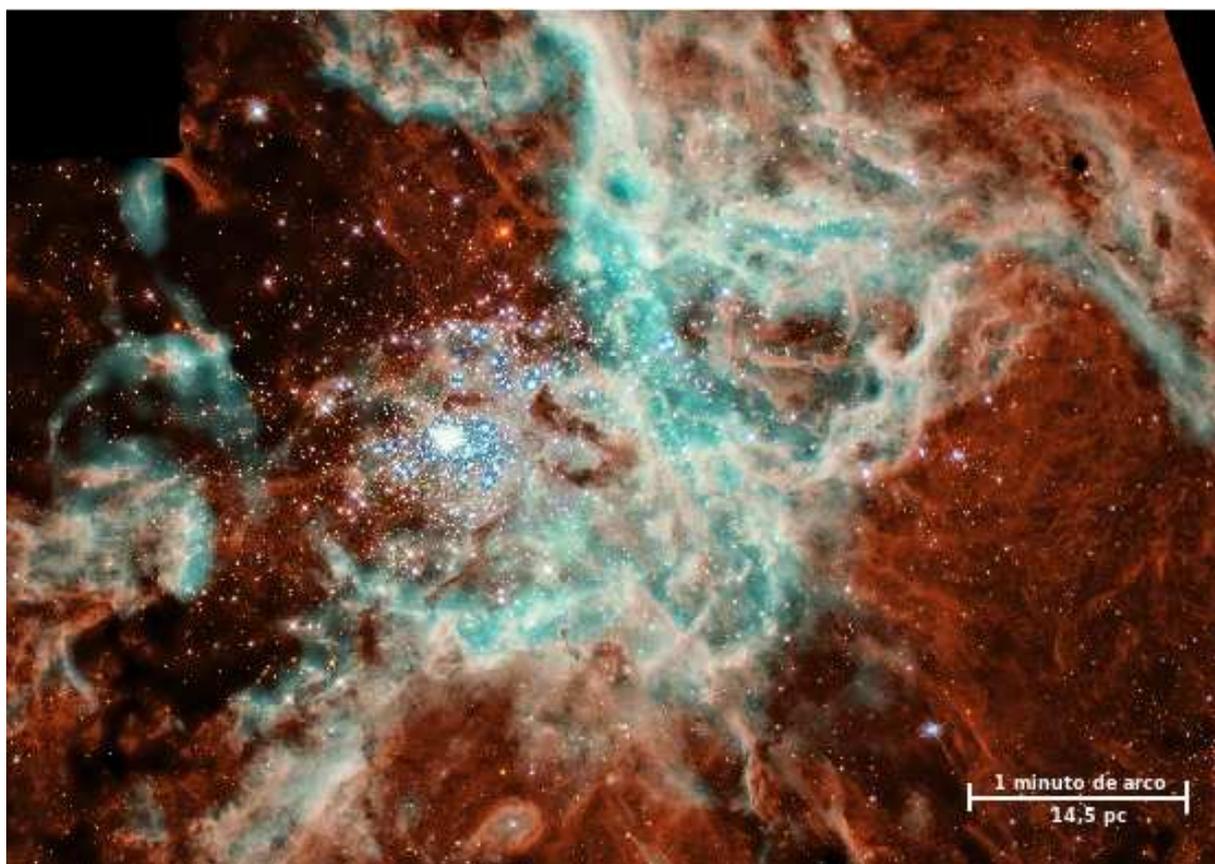


Figura 83 – Mosaico de imagens em cor falsa da região HII 30 Doradus, consistindo de cinco imagens sobrepostas, observadas entre janeiro de 1994 e setembro de 2000 utilizando *Wide Field and Planetary Camera 2* acoplada ao telescópio espacial Hubble, NASA. Equipe composta por N. Walborn and J. Maíz-Apellániz (Space Telescope Science Institute, Baltimore, MD), R. Barbá (La Plata Observatory, La Plata, Argentina) Disponível em <<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2001/21/image/a/>>. Acesso em 24/07/2008.

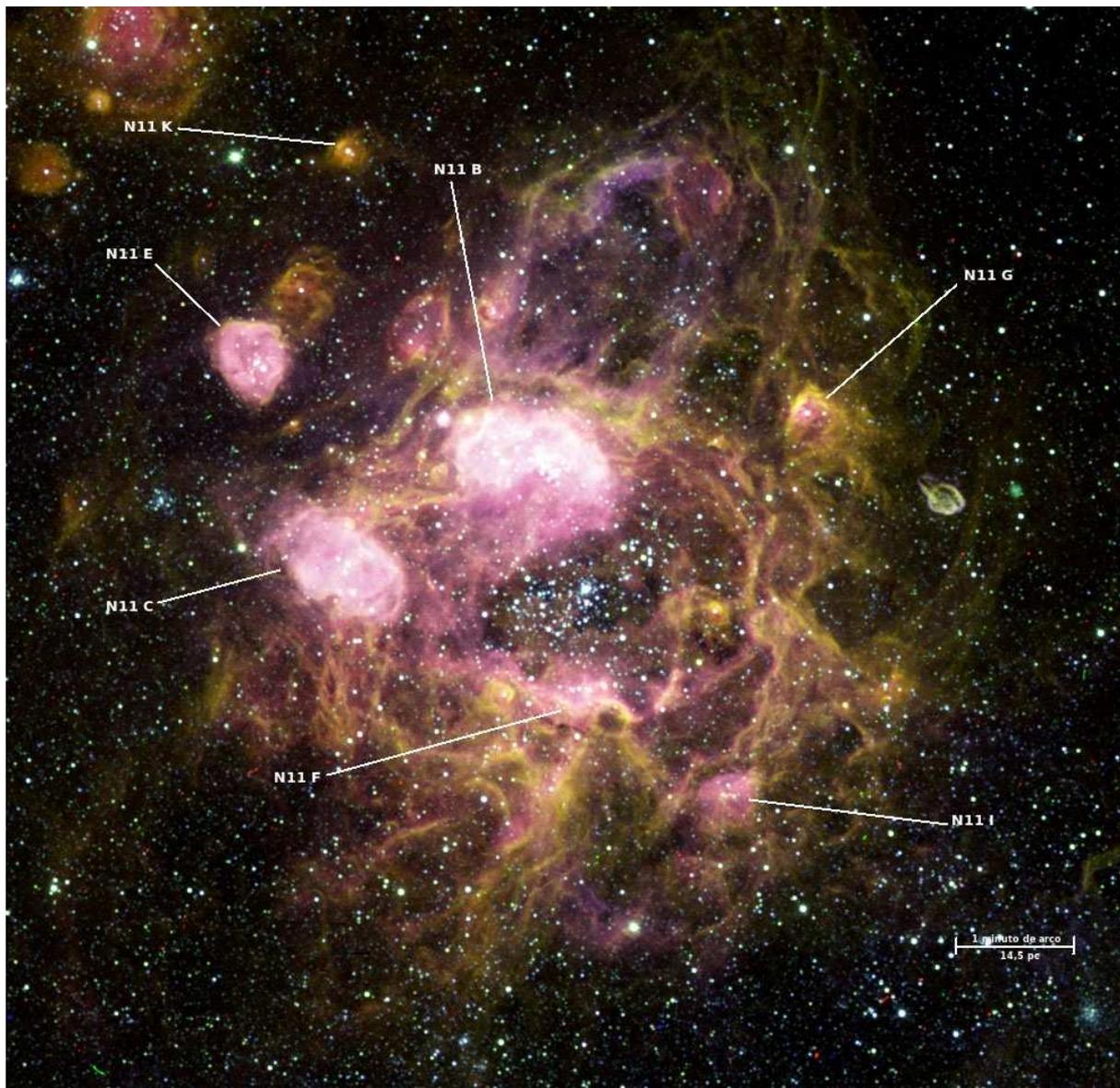


Figura 84 – Imagem em cor falsa do complexo gigante GNM: N11, produzida utilizando três exposições separadas nos filtros nebulares de $H\alpha$, $[S\ II]$ e $[O\ III]$, observada e tratada em março de 1999 pela equipe científica do STSCI, chefiada por Z. Levay e a equipe do CTIO, composta por C. Aguilera, S. Points, and C. Smith, utilizando o telescópio espacial Hubble, NASA. Disponível em <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2004/22/image/c/>. Acesso em 24/07/2008.

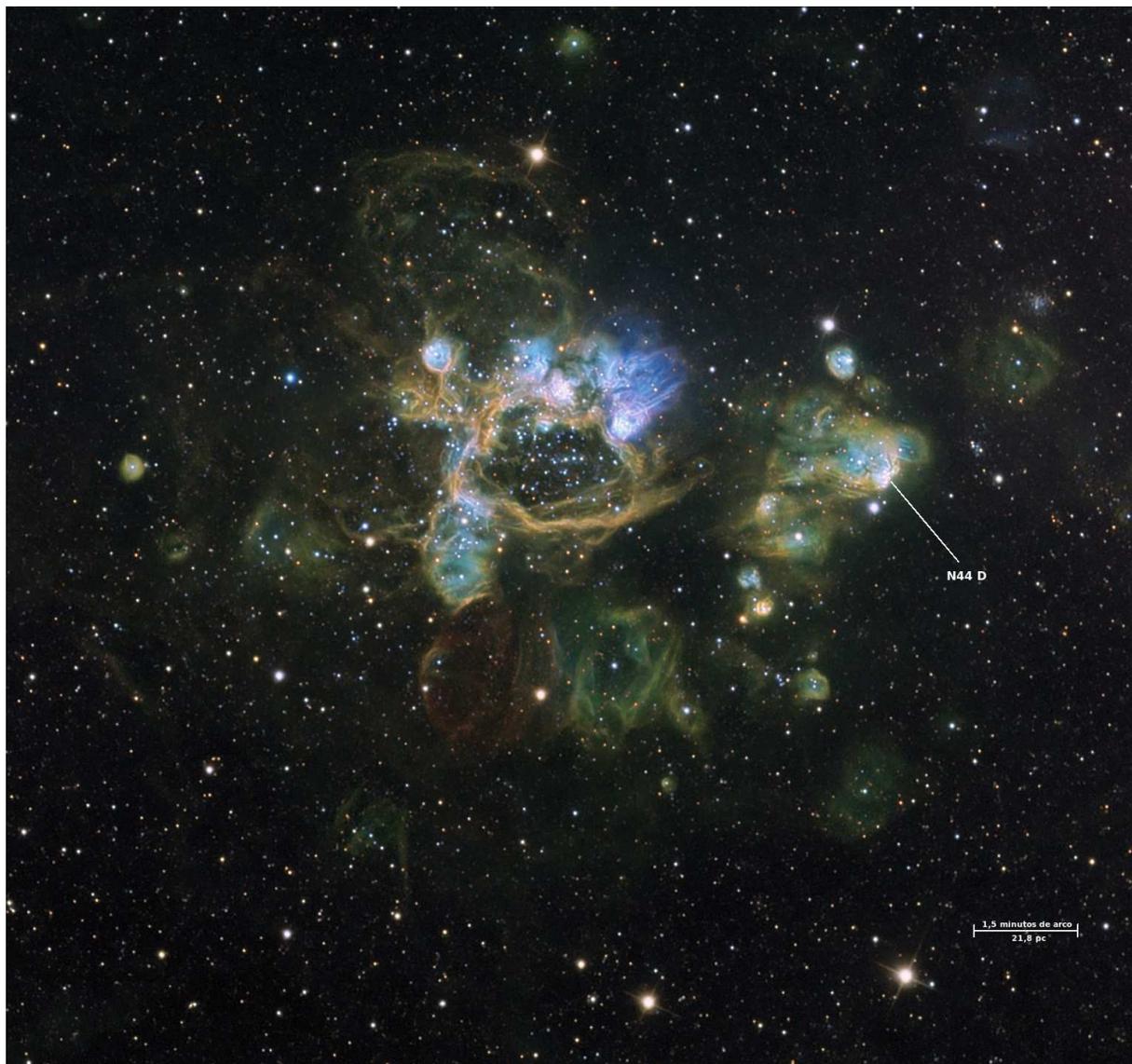


Figura 85 – Imagem em cor falsa da complexo GNM: N44, composta por três imagens obtidas com a utilização de filtros de banda estreita, $H\alpha$, $H\beta$ e $[O III]$, por Don Goldman, Macedon Ranges Observatory, Austrália. Disponível em <<http://www.phys.ncku.edu.tw/~astrolab/mirrors/apod/ap080327.html>>. Acesso em 29/07/2009.

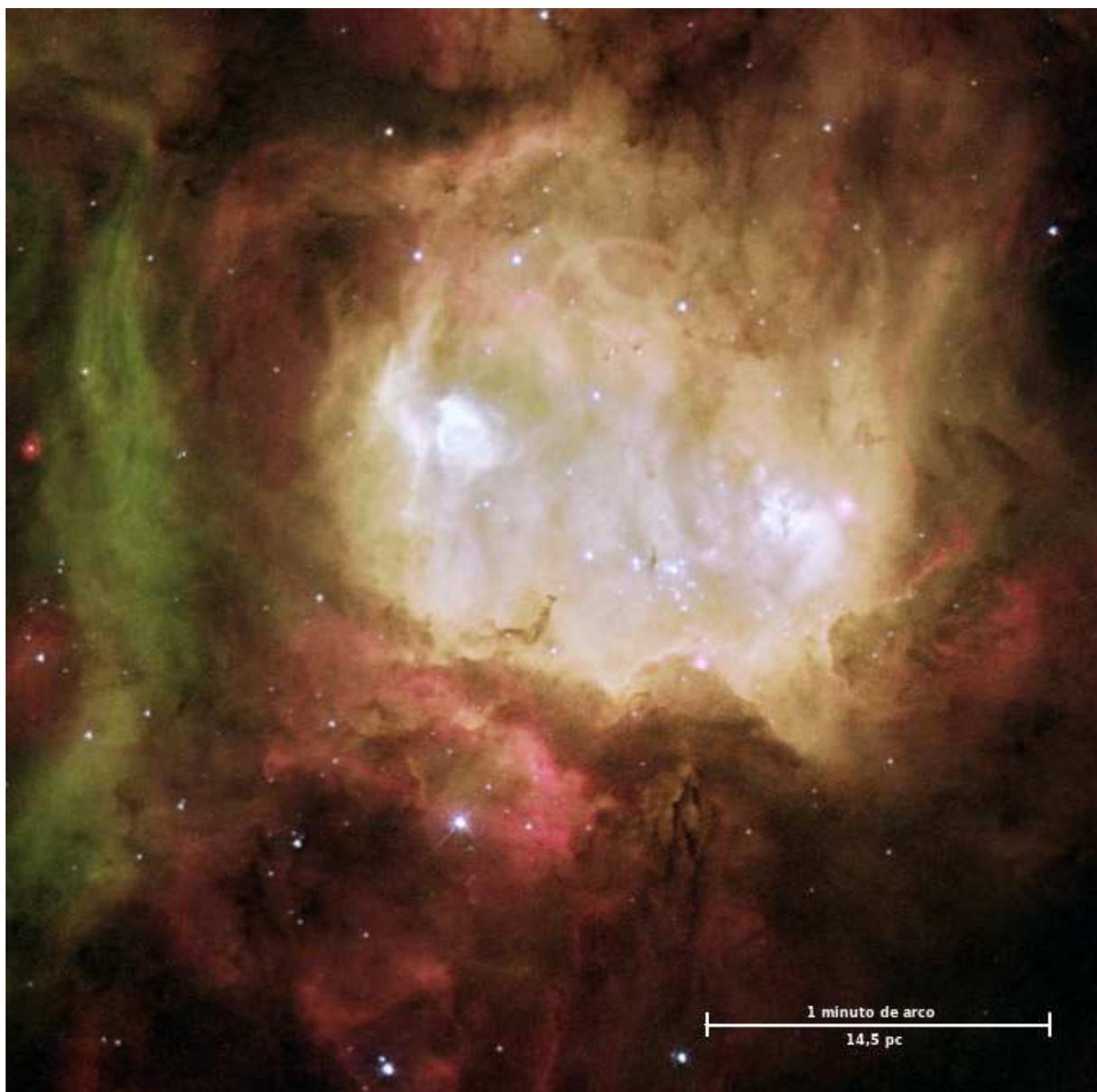


Figura 86 – Imagem em cor falsa da região H II GNM: N160 A, composta por três imagens obtidas com a utilização de filtros de banda estreita, $H\alpha$, $H\beta$ e $[O III]$, em março de 2000 com *Wide Field and Planetary Camera 2* acoplada ao telescópio espacial Hubble, NASA. Observada e tratada pela equipe científica do ESO, chefiada por Mohammad Heydari-Malayeri (Observatoire de Paris, France). Disponível em <<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2001/34/image/a/>>. Acesso em 24/07/2008.

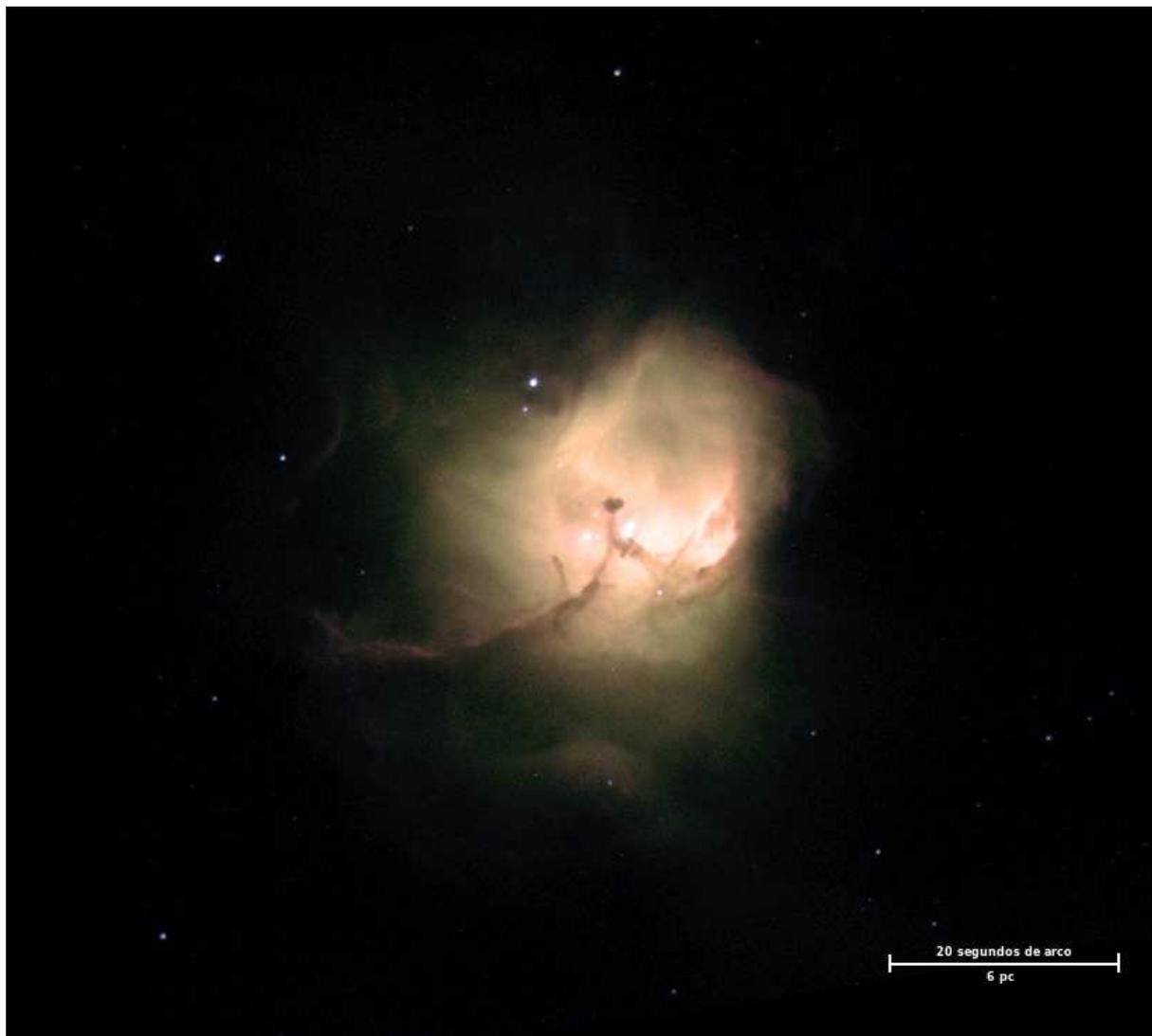


Figura 87 – Imagem em cor falsa da região HII PNM: N81, produzida utilizando três exposições separadas nos filtros nebulares de $H\alpha$, $H\beta$ e $[O III]$, observada e tratada em setembro de 1997, utilizando *Wide Field and Planetary Camera 2* acoplada ao telescópio espacial Hubble, NASA. Disponível em <<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2000/30/image/a/>>. Acesso em 24/07/2008.