



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA – LICENCIATURA**

KELLY FRANK HECKLER

MAPA DE DENSIDADE ELETRÔNICA DA REGIÃO HII RCW 71

CERRO LARGO

2017

KELLY FRANK HECKLER

MAPA DE DENSIDADE ELETRÔNICA DA REGIÃO HII RCW 71

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Física - Licenciatura da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito parcial para obtenção do título de licenciado em Física.

Orientador: Márcio do Carmo Pinheiro
Coorientador: Tiago Vecchi Ricci

CERRO LARGO

2017

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Heckler, Kelly Frank

Mapa de densidade eletrônica da Região HII RCW 71/
Kelly Frank Heckler. -- 2017.
57 f.:il.

Orientador: Márcio do Carmo Pinheiro.

Co-orientador: Tiago Vecchi Ricci.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Curso de
Graduação em Física - Licenciatura , Cerro Largo, RS,
2017.

1. Astronomia. I. Pinheiro, Márcio do Carmo, orient.
II. Ricci, Tiago Vecchi, co-orient. III. Universidade
Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

KELLY FRANK HECKLER

MAPA DE DENSIDADE ELETRÔNICA DA REGIÃO HII RCW 71

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Física - Licenciatura da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito parcial para obtenção do título de licenciado em Física.

Orientador: Márcio do Carmo Pinheiro

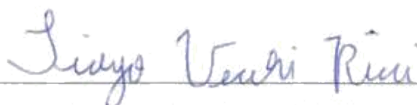
Coorientador: Tiago Vecchi Ricci

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 15/12/17

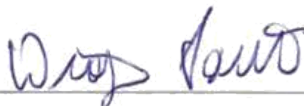
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Márcio do Carmo Pinheiro - UFFS



Prof. Dr. Tiago Vecchi Ricci - UFFS



Prof. Dr. Diogo Pauletti - UFSM

Aos meus pais Rene e Maria Jurema, minha
irmã Suélen e ao meu filho Kauã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, professor Dr. Márcio C. Pinheiro e ao professor Dr. Tiago V. Ricci, que sempre estiveram a disposição para tirar dúvidas e auxiliar no que fosse necessário.

Agradeço a todos os professores que durante toda a graduação contribuíram com seus ensinamentos para a minha formação.

Agradeço às minhas colegas de curso pelos bons momentos vivenciados nos últimos anos.

Agradeço a minha família por todo o apoio recebido para que eu pudesse concluir mais essa etapa.

Agradeço ao meu filho que, mesmo sem entender, me dá força e determinação para lutar pelos meus objetivos. E pelos momentos nos quais tive que trocar as brincadeiras, pelos livros e cadernos.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado, a todos vocês!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo determinar as variações espaciais de densidade eletrônica (n_e) da Região HII RCW 71 através da razão das linhas proibidas do enxofre uma vez ionizado [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$. Além disso, construir um mapa que descreva essas variações. Medidas de densidade eletrônica ponto a ponto em nebulosas fotoionizadas são importantes para verificar a existência de flutuações desse parâmetro na região. Um trabalho anterior sobre RCW 71 indica grandes variações de densidade eletrônica nesse objeto. Os dados foram obtidos no Observatório Pico dos Dias (OPD), em Brasópolis – MG, utilizando o espectrógrafo Cassegrain acoplado ao telescópio de 1,6m de diâmetro. Sobre a Região RCW 71, foram posicionadas 20 fendas longas com tamanho de 5", cada uma, ao longo da direção Leste-Oeste, cobrindo uma faixa de 50"S a 45"N sobre a nebulosa. A fenda de referência (0") foi posicionada sobre a fonte ionizante da região (estrela HD311999). A redução dos dados seguiu o procedimento padrão de redução utilizando o software de análise e redução de dados IRAF: correção de *bias* e *flat-field*, remoção dos raios cósmicos e extração dos espectros unidimensionais. O perfil das linhas foi ajustado com uma função gaussiana, e a razão das linhas bem como a densidade eletrônica foram obtidas utilizando a equação proposta por Proxauf et al. (2014). Flutuações de densidade eletrônica foram detectadas por toda a região RCW 71, com valores típicos de uma região HII. É possível identificar a presença de um elemento que esteja bloqueando a expansão do gás ionizado em algumas direções, pois nessas regiões foram encontradas grandes variações de densidade eletrônica. A existência de flutuações de densidade eletrônica em RCW 71 indica que valores médios, em geral, não são adequados para estudar as propriedades físicas e químicas de uma região HII.

Palavras chave: Nebulosa fotoionizada. Densidade eletrônica. RCW 71.

ABSTRACT

The goal of this work is to determine spatial variations of the electron density (n_e) of the HII Region RCW 71 through the ratio of the forbidden lines of the once-ionized sulfur [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$. Moreover, we aim to build a map to describe these variations. Point-to-point measurements of the electron density in photoionized nebulae are important to verify fluctuations of this parameter within a given region. A previous work about RCW 71 indicated large variations in the electron density of this object. The data were obtained at the Pico dos Dias Observatory (OPD), at Brasópolis - MG, using the Cassegrain spectrograph installed on the 1.6-m diameter telescope. Over the RCW 71 Region, 20 long slits, each with a 5" width, were positioned along the East-West direction, covering a range of 50" S to 45" N across the nebula. The reference slit (0") was positioned on the ionizing source of RCW 71. The data reduction followed the standard procedures using IRAF: bias and flat-field corrections, cosmic ray removal, and extraction of the one-dimensional spectra. The line profiles were fitted with a Gaussian function, and the electron densities were calculated using the equation proposed by Proxauf et al. (2014). Electron density fluctuations were detected throughout the RCW 71 region, with typical values for an HII Region. It is possible to identify the presence of one element that is blocking the expansion of the ionized gas in some directions, since large density variations are seen in such regions. The existence of density fluctuations in RCW 71 indicates that average values, in general, are not adequate to study the physical and chemical properties of an HII region.

Keywords: Photoionized nebula. Electron density. RCW 71.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama dos níveis de energia do [S II].....	16
Figura 2 - Gráfico da densidade eletrônica pela razão de linhas.....	17
Figura 3 - Região HII RCW 71.....	18
Figura 4 - Representação esquemática das fendas posicionadas sobre a Região II RCW 71. .	20
Figura 5 - Imagem do <i>Bias</i> médio.....	20
Figura 6 - Imagem de <i>Flat-field</i> combinada e normalizada.....	21
Figura 7 - Espectro eletromagnético unidimensional da abertura 21 da fenda posicionada sobre a estrela de referência.	22
Figura 8 - Variações espaciais de densidade eletrônica na Região HII RCW 71.....	23
Figura 9 - Corte ao longo da linha 11 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	25
Figura 10 - Corte ao longo da linha 18 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	26
Figura 11 - Corte ao longo da linha 1 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	31
Figura 12 - Corte ao longo da linha 2 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	31
Figura 13 - Corte ao longo da linha 3 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	34
Figura 14 - Corte ao longo da linha 4 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	34
Figura 15 - Corte ao longo da linha 5 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	36
Figura 16 - Corte ao longo da linha 6 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	36
Figura 17 - Corte ao longo da linha 7 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	39
Figura 18 - Corte ao longo da linha 8 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	39
Figura 19 - Corte ao longo da linha 9 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	42
Figura 20 - Corte ao longo da linha 10 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	42
Figura 21 - Corte ao longo da linha 12 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	45
Figura 22 - Corte ao longo da linha 13 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	45
Figura 23 - Corte ao longo da linha 14 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	48
Figura 24 - Corte ao longo da linha 15 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	48
Figura 25 - Corte ao longo da linha 16 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	51
Figura 26 - Corte ao longo da linha 17 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	51
Figura 27 - Corte ao longo da linha 19 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	54
Figura 28 - Corte ao longo da linha 20 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada sobre a estrela de referência (0'').....	24
Tabela 2 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 35'' da fenda de referência (0'') na direção Norte.....	27
Tabela 3 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 50'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	30
Tabela 4 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 45'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	32
Tabela 5 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 40'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	33
Tabela 6 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 35'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	35
Tabela 7 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 30'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	37
Tabela 8 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 25'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	38
Tabela 9 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 20'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	40
Tabela 10 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 15'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	41
Tabela 11 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 10'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	43
Tabela 12 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 5'' da fenda de referência (0'') na direção Sul.....	44
Tabela 13 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 5'' da fenda de referência (0'') na direção Norte.....	46
Tabela 14 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 10'' da fenda de referência (0'') na direção Norte.....	47
Tabela 15 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 15'' da fenda de referência (0'') na direção Norte.....	49

Tabela 16 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 20" da fenda de referência (0") na direção Norte.....	50
Tabela 17 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 25" da fenda de referência (0") na direção Norte.....	52
Tabela 18 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 30" da fenda de referência (0") na direção Norte.....	53
Tabela 19 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 40" da fenda de referência (0") na direção Norte.....	55
Tabela 20 - Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 45" da fenda de referência (0") na direção Norte.....	56

LISTA DE SIGLAS

Å	Angstroms
λ	Comprimento de onda
"	Segundos de arco, unidade de medida de ângulo
CCD	Dispositivo de Carga Acoplado, em inglês <i>Charge Coupled Device</i>
ESO	Observatório Europeu do Sul, em inglês <i>European Southern Observatory</i>
eV	Elétron-Volt, 1 eV equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ J
IRAF	<i>Image Reduction and Analysis Facility</i>
K	Kelvin, unidade de medida de temperatura no Sistema Internacional de Unidades.
LNA	Laboratório Nacional de Astrofísica
N	Norte
n_e	Densidade eletrônica
OPD	Observatório Pico dos Dias
R	Razão de linhas
S	Sul
T_e	Temperatura eletrônica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	PROPRIEDADES DE REGIÕES HII.....	14
1.1.1	Densidade eletrônica.....	15
1.2	OBJETIVOS DO ESTUDO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	RCW 71.....	18
3	DESCRIÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS.....	19
3.1	REDUÇÃO DOS DADOS.....	19
3.2	DENSIDADE ELETRÔNICA.....	21
3.3	MAPA SUPERFICIAL DE DENSIDADE ELETRÔNICA.....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
6	REFERÊNCIAS.....	29
	APÊNDICE - Resultados.....	30

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, adquiriu-se um vasto conhecimento sobre a forma e a composição da Via Láctea. Sabe-se que ela é composta por matéria escura e matéria bariônica (estrelas, gás e poeira). Em números aproximados, as estrelas são responsáveis por 90% da massa visível, enquanto que o gás corresponde a aproximadamente 10% e a poeira reúne menos de 1% da massa do gás. Já a densidade do meio interestelar é de 1 átomo de hidrogênio por centímetro cúbico, enquanto que a densidade de poeira é de 100 grãos por quilômetro cúbico (KEPLER; SARAIVA, 2004).

Quando algumas nuvens de gás interestelar estão próximas de algum evento cósmico que libera muita energia, elas podem ser perturbadas e se concentrar gravitacionalmente em alguns pontos. O acúmulo de matéria em uma pequena região pode dar origem às estrelas e essas regiões são conhecidas como berço de formação estelar.

O gás que não dá origem às estrelas pode se acumular nas proximidades da formação estelar. Se há a formação de estrelas de alta massa na região de formação estelar, formam-se as nebulosas fotoionizadas chamadas de Regiões HII. O nome refere-se ao hidrogênio uma vez ionizado, predominante nas nebulosas. Tais regiões são nebulosas de gás fotoionizadas por estrelas (que possuem uma temperatura efetiva em torno de 25000 K) do tipo espectral O e *early* B. Estas estrelas emitem um pico de radiação na faixa do ultravioleta, ou seja, os fótons emitidos possuem energia acima de 13,6 eV, maior que o potencial de ionização do átomo de hidrogênio. O potencial de ionização refere-se a energia necessária para arrancar o elétron do átomo. A fotoionização da nuvem ocorre com o choque entre os fótons emitidos pela estrela e os átomos presentes na nuvem, no qual os elétrons absorvem a energia do fóton e rompem a ligação com o núcleo (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

As nebulosas fotoionizadas são caracterizadas por linhas espectrais em emissão, por isso também são chamadas de nebulosas em emissão, e podem ser facilmente vistas através de observações de outras galáxias por emitirem parte da radiação na faixa do espectro visível. Observa-se que as regiões HII se encontram, predominantemente, no braços das galáxias espirais. Fazendo uma analogia com a observação de outras galáxias, há indícios de que a Via Láctea também possui uma estrutura em espiral, afinal existem inúmeras regiões HII na nossa Galáxia, como por exemplo, a região estudada neste trabalho. Portanto, determinar as propriedades de nebulosas fotoionizadas são importantes na descrição da estrutura e composição dos braços espirais da nossa Galáxia (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

1.1 PROPRIEDADES DE REGIÕES HII

O estudo das propriedades das nebulosas fotoionizadas se dá através das linhas em emissão geradas pelos processos físicos de fotoionização, recombinação, excitação colisional, desexcitação radiativa e desexcitação colisional. A intensidade das linhas em emissão, formadas por esses processos, depende da probabilidade de que cada evento ocorra (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

A fotoionização ocorre em regiões em que há incidência de fótons com altas energias, maiores que os potenciais de ionização dos átomos. Os fótons altamente energéticos são absorvidos pelos átomos e o elétron adquire energia para se desligar do núcleo nesse processo. Se a energia do fóton for superior ao potencial de ionização do átomo, então o elétron adquire energia cinética igual à diferença de energia do fóton e do potencial de ionização.

O processo inverso à fotoionização é a recombinação, no qual o íon se recombina com um elétron livre. O elétron pode recombinar com o íon para qualquer um dos estados excitados, caindo gradativamente de um estado para outro através de desexcitações radiativas ou desexcitações colisionais, até chegar no nível de mais baixa energia, o estado fundamental.

A excitação colisional e a desexcitação colisional são resultados da colisão entre os átomos e elétrons presentes nas nebulosas. Durante a colisão, os átomos podem ser excitados (adquirindo energia) ou desexcitados (perdendo energia). A desexcitação colisional não forma as linhas espectrais em emissão, já que a transição para o nível mais baixo se dá pela perda de energia na colisão. De acordo com Osterbrock e Ferland, (2006), a probabilidade de colisão entre os átomos e elétrons possui uma dependência da densidade eletrônica (n_e), sendo que a altas densidades a colisão entre as partículas é predominante.

Já a desexcitação radiativa ocorre em regiões com baixa densidade ($n_e \leq 10^4 \text{ cm}^{-3}$) no qual a chance de colisões entre os átomos e elétrons se torna muito baixa. A chamada desexcitação radiativa ocorre quando o elétron, de um estado excitado, decai para um nível mais baixo depois de certo tempo, emitindo um fóton com energia específica. O decaimento ocorre de maneira espontânea e o tempo em que o elétron permanece em cada estado define se o nível é instável ou metaestável. No nível de energia instável, o tempo médio de vida é da ordem de 10^{-8} segundos, enquanto que no nível metaestável, o tempo de vida médio é da ordem de 10^4 segundos. As linhas originadas por desexcitação radiativa, de um elétron que se encontra em um nível metaestável, são chamadas de linhas proibidas. Sob condições normais

na Terra, no qual a densidade é muito alta, é muito difícil criar condições que favoreçam a aparição das linhas proibidas, até mesmo em laboratório (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

Visto os processos físicos e as condições sob as quais eles ocorrem, pode-se fazer um estudo sobre a radiação que é emitida durante a transição entre cada nível dos íon presentes na nebulosa fotoionizada.

1.1.1 Densidade eletrônica

A densidade eletrônica pode ser estimada comparando a intensidade de duas linhas espectrais em emissão de um mesmo íon. Essas estimativas se utilizam de linhas em emissão geradas por excitação colisional ou recombinação e posterior desexcitação radiativa, assumindo que a temperatura eletrônica (T_e) se distribui uniformemente pela nebulosa.

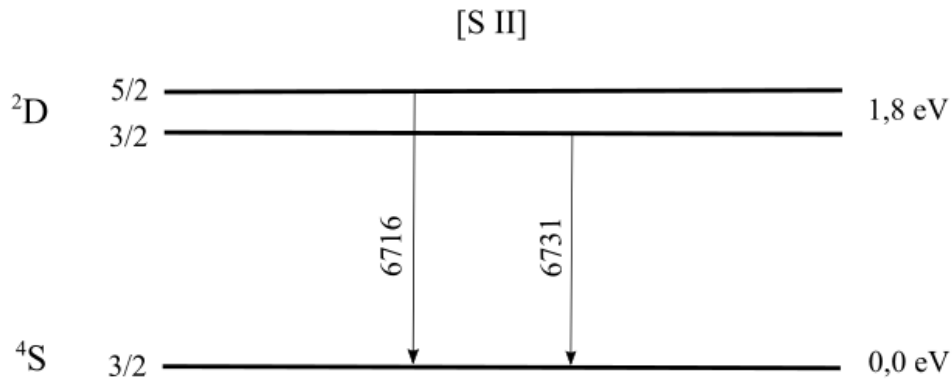
A intensidade das linhas em emissão são proporcionais à probabilidade de que aconteça a desexcitação radiativa. Logo, a razão (R) dessas linhas também vai depender da densidade eletrônica. Para a estimativa, utiliza-se duas linhas em emissão diferentes com níveis de energia muito próximas. As linhas proibidas do enxofre uma vez ionizado [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$ são um bom exemplo de estimador de densidade eletrônica muito utilizado (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

Se a densidade eletrônica da região for abaixo de 10^4 partículas por cm^3 , uma densidade eletrônica típica de uma Região HII, a probabilidade de o átomo se desexcitar radiativamente vai ser maior, e a forma de saber isso é observando a intensidade das linhas espectrais em emissão (OSTERBROCK; FERLAND, 2006).

Observa-se, no entanto, uma discrepância entre os valores de densidade eletrônica estimado com o método descrito acima (excitação colisional) e estimativas via linhas de recombinação do hidrogênio na região do rádio. De acordo com Osterbrock e Ferland (2006), essa discrepância entre os valores encontrados é um problema ainda em aberto com relação as nebulosas fotoionizadas.

Através do diagrama mostrado na Figura 1, podemos observar que as linhas $\lambda 6716$ e $\lambda 6731$ do [S II] se encontram na região do ótico (4000 \AA a 7500 \AA) e apresentam as características necessárias para a determinação da densidade eletrônica.

Figura 1: Diagrama dos níveis de energia do [S II]



Fonte: OSTERBROCK; FERLAND, 2006.

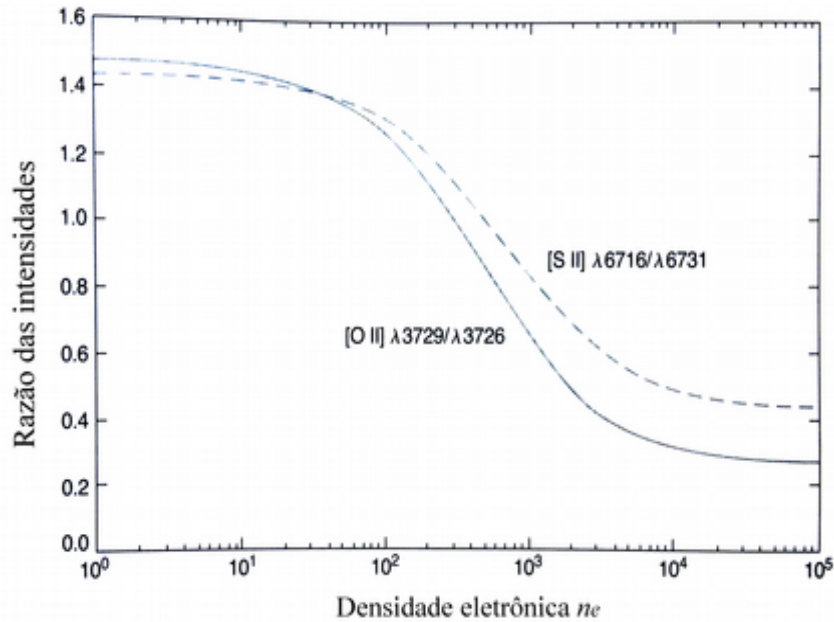
Nota: O comprimento de onda das transições estão representados em angstroms (\AA).

Para a estimativa de densidade eletrônica, faz-se a razão das intensidades das linhas $I(\lambda 6716)/I(\lambda 6731)$ do [S II], e então é realizada uma análise do gráfico da Figura 2 que descreve o comportamento da densidade eletrônica através do valor encontrado para a razão das linhas proibidas. A curva desse gráfico pode ser ajustada pela equação indicada por Proxauf et al. (2014), que é um ajuste puramente matemático, onde $R = I(\lambda 6716)/I(\lambda 6731)$:

$$\log(n_e [cm^{-3}]) = 0.0543 \tan(-3.0553 R + 2.8506) + 6.98 - 10.6905 R + 9.9186 R^2 - 3.5442 R^3$$

O estudo da densidade eletrônica ponto a ponto em nebulosas fotoionizadas se faz importante pelo fato de que pode-se demonstrar a existência ou não de flutuações de densidade eletrônica por toda uma região. Estudos seguintes, que dependem de parâmetros como a densidade eletrônica, podem manifestar imprecisões significativas se assumir um valor constante para n_e . Além disso, pode ser possível analisar se o comportamento apresentado pela densidade eletrônica é coerente com os modelos atuais que descrevem a evolução e dinâmica desses objetos.

Figura 2: Gráfico da densidade eletrônica pela razão de linhas.



Fonte: OSTERBROCK; FERLAND, 2006.

Nota: A temperatura eletrônica é considerada constante, com $T_e = 10000\text{K}$.

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo detalhado sobre a Região HII RCW 71, a fim de estimar a densidade eletrônica da região utilizando a razão de linhas proibidas do enxofre uma vez ionizado [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$, buscando encontrar variações espaciais de densidade eletrônica típicas de uma região HII ($n_e \sim 10^3$). Espera-se encontrar uma densidade eletrônica baixa na região central da nebulosa, onde se encontra a principal fonte ionizante, crescendo radialmente para as regiões periféricas, pois a radiação emitida da fonte ionizante acaba “varrendo” radialmente a matéria da região próxima à ela, para as regiões periféricas. Além disso, construir um mapa que descreva as variações espaciais de densidade eletrônica a partir de estimativas pontuais da região.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico referente ao objeto de estudo, expondo as principais características conhecidas. O Capítulo 3 trata da descrição e redução dos dados, apresentando o passo a passo dos procedimentos realizados. No Capítulo 4 estão expostos os resultados obtidos sobre o objeto em estudo, onde apresenta-se os valores estimados de densidade eletrônica da região, bem como o mapa criado com as estimativas pontuais de densidade. E, finalmente, o Capítulo 5 que apresenta as considerações finais.

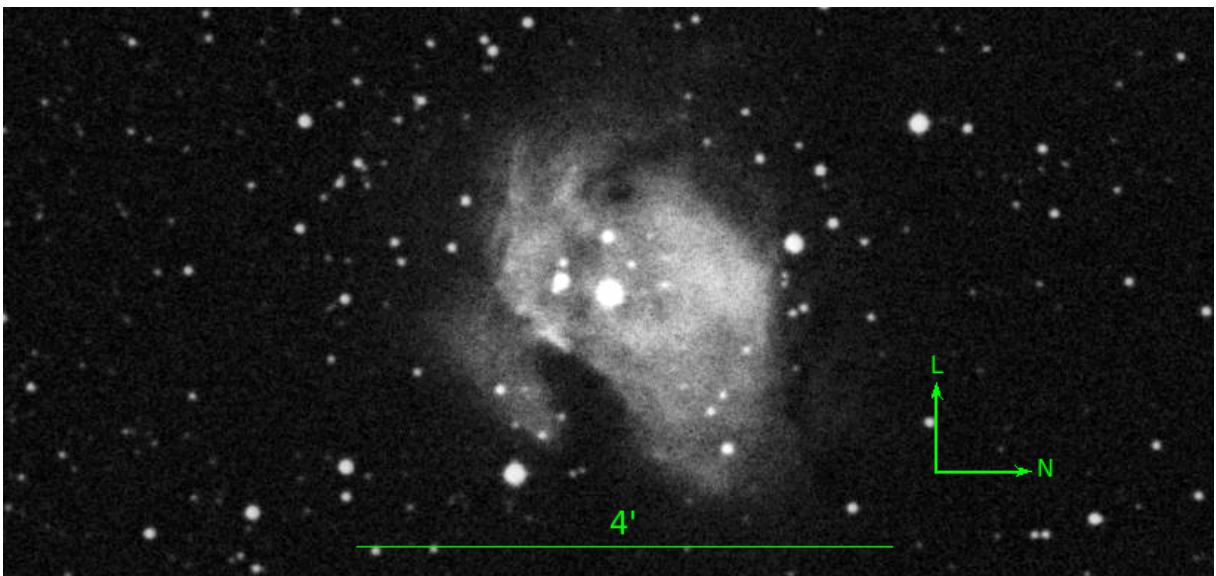
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RCW 71

A Região HII RCW 71, demonstrada na Figura 3, também chamada de Gum 46 (GUM, 1955), é uma região pouco estudada até o momento. Ela possui uma dimensão de 4x3 minutos de arco (RODGERS et al., 1960), e de acordo com Avedisova e Kondratenko (1984), a nebulosa RCW 71 é fotoionizada pela estrela CPD -60 3412 (HD 311999) de tipo espectral O 9,5 de classe de luminosidade V.

Danks et al. (1976) realizou um estudo sobre nebulosas da região sul da Via Láctea no qual ele encontra um valor médio de densidade eletrônica de $n_e \sim 1260 \text{ cm}^{-3}$ para a nebulosa RCW 71, alegando que essa região apresenta uma grande variação de densidade eletrônica. Esse valor de n_e foi encontrado considerando a temperatura eletrônica constante por toda nebulosa ($T_e = 7500\text{K}$) e utilizando como sensor de densidade eletrônica as linhas proibidas do enxofre uma vez ionizado [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$.

Figura 3: Região HII RCW 71



Fonte: *European Southern Observatory Program (ESO)*

Nota: Imagens na banda R localizada com o *software Aladin*.

3 DESCRIÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS

Para a análise e redução dos dados foram utilizados dados espectroscópicos de fenda longa obtidos para a Região HII RCW 71. A coleta de dados foi efetuada por Márcio do Carmo Pinheiro, Diogo Pauletti e Cristian M. Ledur, durante os dias 13, 14 e 15 de maio de 2013, no Observatório Pico dos Dias (OPD) em Brazópolis – Minas Gerais, mantido e administrado pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), com sede em Itajubá – Minas Gerais.

Para a coleta de dados foi utilizado o espectrógrafo Cassegrain acoplado ao telescópio de 1,6m de diâmetro do OPD. O detector utilizado foi o CCD (Dispositivo de Carga Acoplado, em inglês *Charge Coupled Device*) Ikon 9867 de 2048x2048 pixels, com escala espacial de $0,51'' \text{ pixel}^{-1}$, e uma rede de dispersão de 1200 linhas mm^{-1} , cobrindo uma faixa de 6020Å a 6980Å. O CCD é um dispositivo utilizado na obtenção de imagens que, basicamente, converte fótons em elétrons, e cada elemento do detector é chamado de pixel.

As fendas foram posicionadas ao longo da direção Leste-Oeste sobre a região RCW 71, com tempo total de exposição de 1200 segundos. Cada fenda longa, [ilustrada na Figura 4](#), possui [uma largura](#) de $5''$, resultando em 20 posições que cobrem a região de $50''\text{S}$ a $45''\text{N}$ sobre a nebulosa. A fenda de referência (posição $0''$) foi posicionada sobre o centro da estrela HD311999, identificada como a principal fonte de ionização da Região HII (AVEDISOVA; KONDRATENKO, 1984).

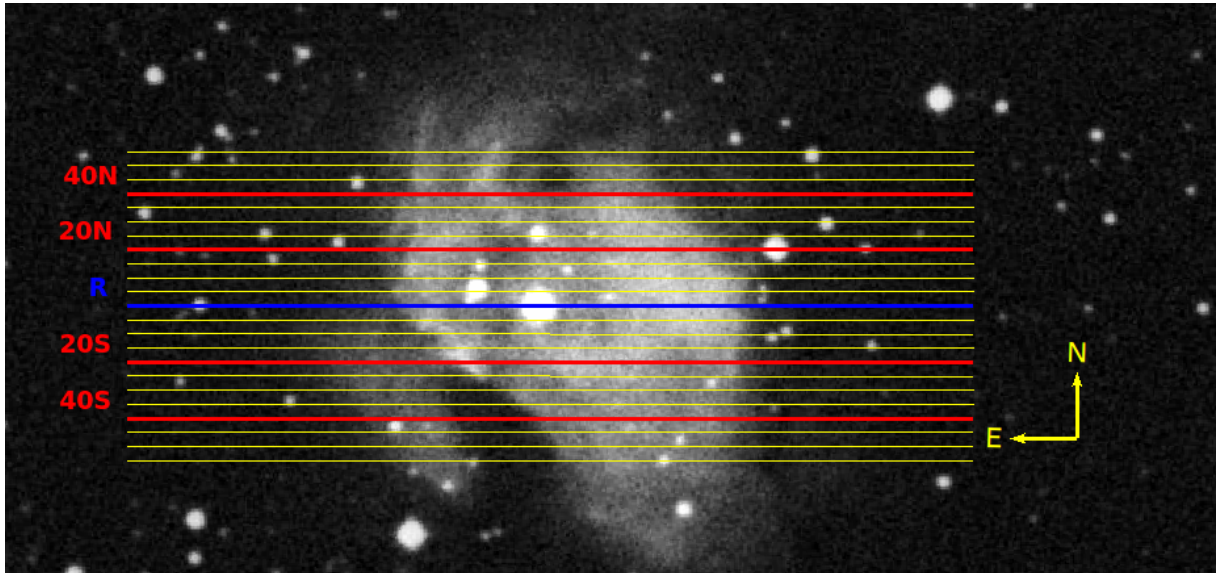
3.1 REDUÇÃO DOS DADOS

A redução dos dados foi realizada através dos pacotes de análise e redução de dados IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*), seguindo o procedimento padrão: subtração de *bias* e divisão por *flat-field*, remoção dos raios cósmicos e a extração dos espectros unidimensionais. A calibração em fluxo e a calibração em comprimento de onda não foram feitas pois as linhas utilizadas para fazer a razão são de comprimento de onda muito próximas, sofrendo praticamente as mesmas variações na sensibilidade do CCD. Além disso, regiões HII possuem linhas em emissão características, o que facilita a identificação das linhas de interesse.

Primeiramente, foi analisado um conjunto de imagens *flat-field* para encontrar a região útil da imagem através da tarefa **implot**. Neste passo, indica-se uma região na borda das

imagens a ser descartada pela grande variação das contagens no CCD, devendo ser aplicado em todas as imagens.

Figura 4: Representação esquemática das fendas posicionadas sobre a Região II RCW 71.

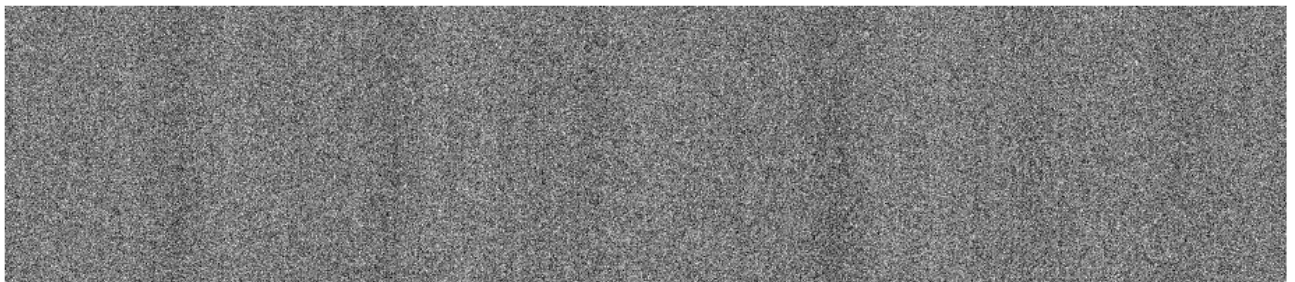


Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: Imagens na banda R obtida do *European Southern Observatory Program* (ESO) e localizada com o *software* Aladin.

O próximo passo é remover os efeitos aditivos gerados durante a leitura dos elétrons pelo CCD. Esse ruído de leitura é chamado de *bias* (Fig. 5). As imagens *bias* consistem em imagens com tempo de exposição nulo ou de 1 segundo, que devem ser combinadas com a tarefa **zerocombine**, resultando em uma imagem de *bias* zero que deve ser subtraída das imagens *flat-field* e objeto através da tarefa **ccdproc**.

Figura 5: Imagem do *Bias* médio

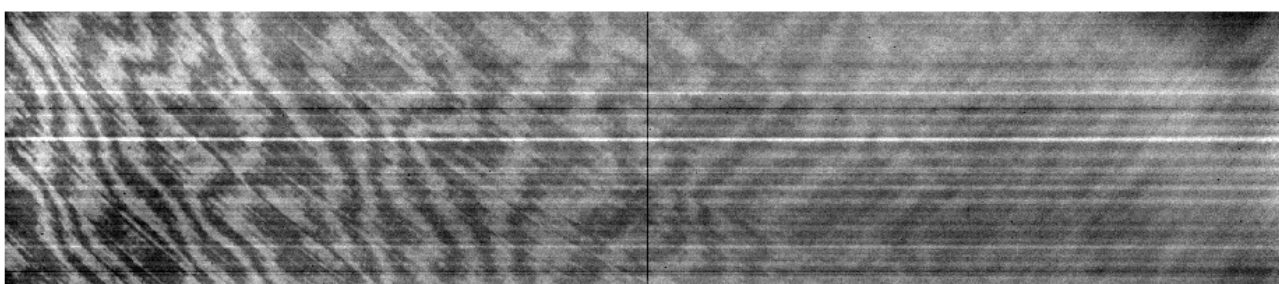


Fonte: Elaborado pelo autor

Nota: Imagem *bias* combinada com a tarefa **zerocombine**/IRAF.

Além do ruído de leitura, deve-se remover os efeitos de variação na sensibilidade pixel a pixel do detector. Para isso faz-se um conjunto de imagens *flat-fields* que são obtidas expondo o CCD a uma fonte de luz uniforme. Para remover esse efeito multiplicativo, será feito uma média das imagens *flat-fields* com a tarefa **flatcombine** e em seguida a normalização com a tarefa **longslit.response** (Fig. 6). Então, a imagem gerada deve ser dividida pelas imagens do objeto com a tarefa **ccdproc**.

Figura 6: Imagem de *Flat-field* combinada e normalizada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: Imagens obtidas em 13 de maio de 2013, combinadas com a tarefa **flatcombine** normalizadas com a tarefa **response/IRAF**.

Removidos os efeitos do detector, removeu-se os raios cósmicos que são detectados pelo CCD mas que não fazem parte do objeto observado. Os raios cósmicos são partículas altamente energéticas provindas do espaço. A remoção dos raios cósmicos foi realizada manualmente através da tarefa **imedit**.

Finalizados os processos básicos de redução de espectros de fenda longa, iniciou-se a extração dos espectros unidimensionais.

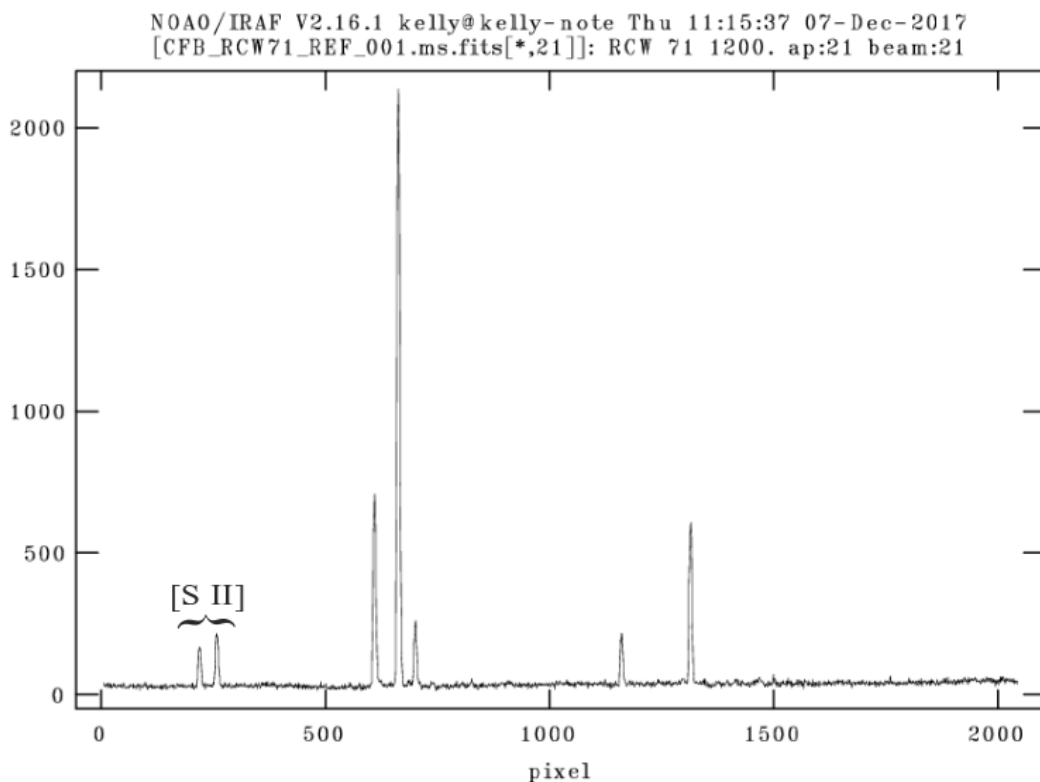
Foi adotado um tamanho de abertura de 5'' somando um total de 45 aberturas por exposição. A extração dos espectros unidimensionais e correção de desalinhamento ao longo do eixo de dispersão (utilizando a função *trace*) foram realizados com a tarefa **twodspec.apextract.apall** (Fig. 7).

3.2 DENSIDADE ELETRÔNICA

Neste trabalho, será utilizada a razão das linhas proibidas do enxofre uma vez ionizado [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$ como sensor de densidade eletrônica da Região HII RCW 71.

O perfil das linhas do espectro unidimensional foi ajustado com uma função gaussiana. A função gaussiana, a razão das linhas e a determinação da densidade eletrônica foram realizadas automaticamente através de um *script* reproduzível em R^1 , criado pelo Dr. Tiago Vecchi Ricci, utilizando a equação indicado por Proxauf et al. (2014). Para $R \geq 1.44$ a densidade eletrônica foi considerada como $n_e = 0 \text{ cm}^{-3}$, enquanto que para razões $R \leq 0.4$, a densidade eletrônica foi considerada como $n_e = 8000 \text{ cm}^{-3}$, sendo que para esses casos a densidade eletrônica podia resultar em qualquer valor, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 7: Espectro eletromagnético unidimensional da abertura 21 da fenda posicionada sobre a estrela de referência.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: Na figura estão indicadas as linhas proibidas do enxofre uma vez ionizado [S II]. Deve-se lembrar que os espectros não foram calibrados em fluxo e comprimento de onda. No eixo vertical observa-se a intensidade das linhas.

3.3 MAPA SUPERFICIAL DE DENSIDADE ELETRÔNICA

Com os valores de densidade eletrônica ponto a ponto da região RCW 71, foi possível elaborar um mapa que descreva as variações espaciais de densidade eletrônica. O mapa foi

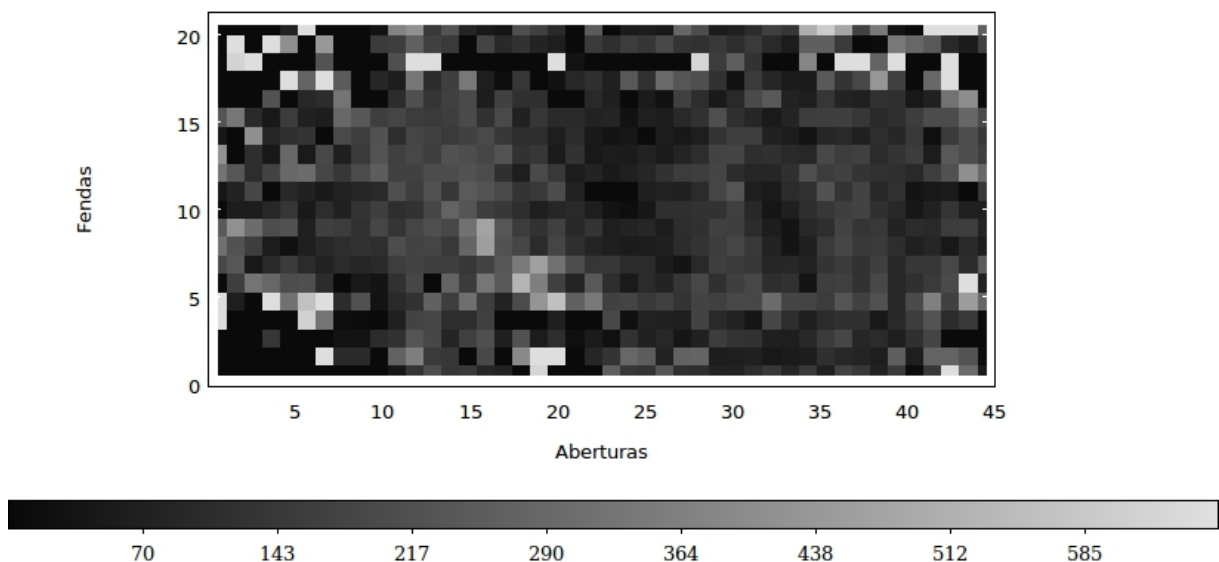
¹ O software R é um programa de análise estatísticas e gráficas, disponível em: <https://www.r-project.org/>.

construído a partir de um arquivo texto contendo os valores de densidade ponto a ponto, no qual cada linha (região de 5"x5") corresponde a um píxel. O arquivo texto foi convertido em imagem através da tarefa *rtextimage* no IRAF.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a razão de linhas do enxofre uma vez ionizado foi possível estimar a densidade eletrônica de 900 pontos da Região HII RCW 71. Na Figura 8, podemos observar o mapa de densidade eletrônica, no qual cada píxel da imagem corresponde a uma região de $5'' \times 5''$, sendo que no eixo vertical encontram-se as fendas posicionadas sobre a Região HII RCW 71, contendo o total de 20 fendas que cobrem a região de $50''S$ a $45''N$, enquanto que no eixo horizontal encontram-se as 45 aberturas de cada fenda.

Figura 8: Variações espaciais de densidade eletrônica na Região HII RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: A barra inferior indica a intensidade de cada píxel, que corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado. Cada píxel corresponde a um tamanho de $5'' \times 5''$.

Pode-se observar, na Figura 8, que há flutuações de densidade eletrônica por toda nebulosa, concordando com os valores esperados de uma região HII. Encontrou-se uma densidade baixa ($n_e < 100 \text{ cm}^{-3}$) onde está localizada a fonte de ionização da região RCW 71 e alta ($n_e > 8000 \text{ cm}^{-3}$) nas regiões periféricas. É possível observar que a nuvem de gás ionizado se espalha ao longo do eixo horizontal (Fig. 8), enquanto que no eixo vertical, a expansão da nuvem parece estar sendo freada por algum elemento presente naquela região (pode ser que existam nuvens de poeira nos entornos da região, que estejam boqueando a expansão do gás ionizado). A baixa densidade eletrônica observada no centro da região pode ser devido à radiação emitida pela estrela ionizante que acaba varrendo radialmente o gás ionizado. Por esse motivo, também, esperava-se encontrar um gradiente radial de densidade.

Na tabela 1 pode-se observar os 45 valores de razão de linhas do [S II] e densidade eletrônica encontrados para a fenda posicionada sobre a estrela de referência ($0''$).

Tabela 1: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da fenda posicionada sobre a estrela de referência ($0''$).

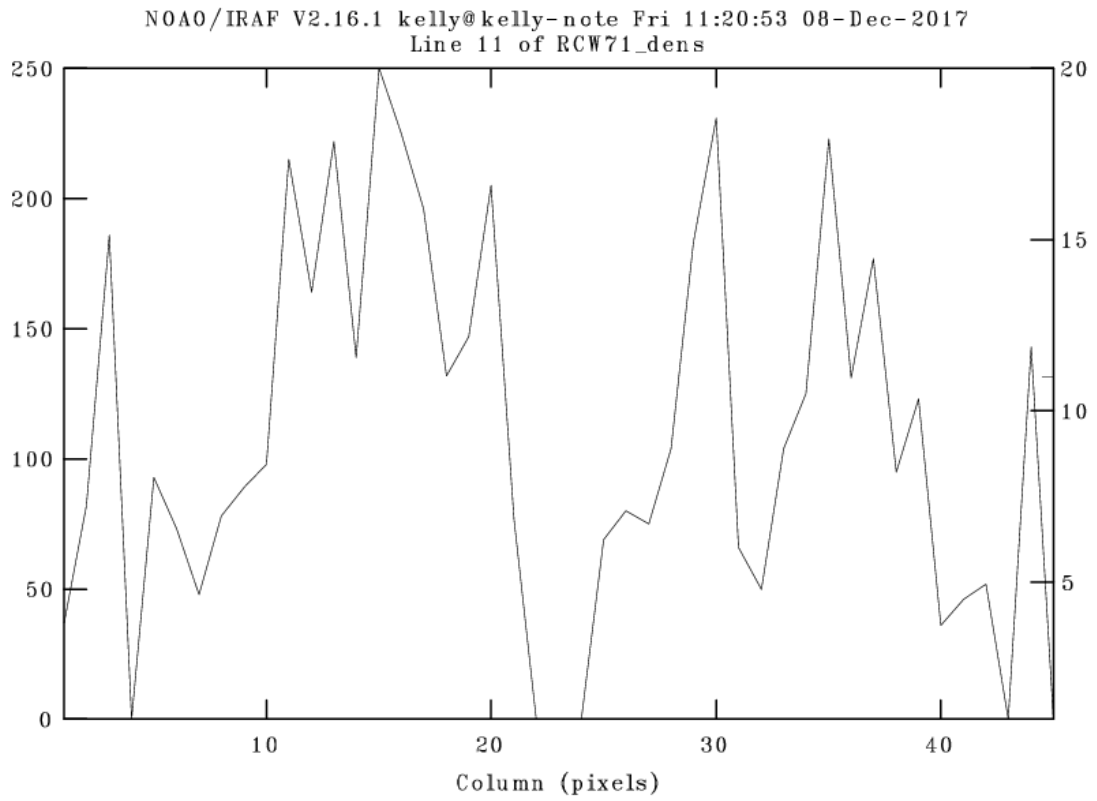
Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm^{-3})	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm^{-3})
1	1,4	37	23	0,0	0
2	1,3	83	24	1,5	0
3	1,2	186	25	1,3	69
4	1,6	0	26	1,3	81
5	1,3	93	27	1,3	75
6	1,3	73	28	1,3	105
7	1,4	49	29	1,2	184
8	1,3	79	30	1,2	231
9	1,3	90	31	1,3	66
10	1,3	98	32	1,4	50
11	1,2	215	33	1,3	104
12	1,2	164	34	1,3	126
13	1,2	223	35	1,2	223
14	1,2	139	36	1,2	131
15	1,1	251	37	1,2	178
16	1,2	226	38	1,3	95
17	1,2	197	39	1,3	123
18	1,2	132	40	1,4	36
19	1,2	148	41	1,4	47
20	1,2	206	42	1,4	52
21	1,3	77	43	1,5	0
22	1,5	0	44	1,2	143
			45	1,6	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: A abertura 1 está localizada ao leste da estrela de referência, enquanto que a abertura 45 está localizada ao oeste. A abertura 23 corresponde ao centro da estrela de referência.

Já a Figura 9 demonstra um corte ao longo da linha 11 do mapa de densidade eletrônica da Figura 8, que corresponde a fenda posicionada sobre a estrela de referência, indicando a intensidade (densidade eletrônica) dos pixels correspondente à Tabela 1.

Figura 9: Corte ao longo da linha 11 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.

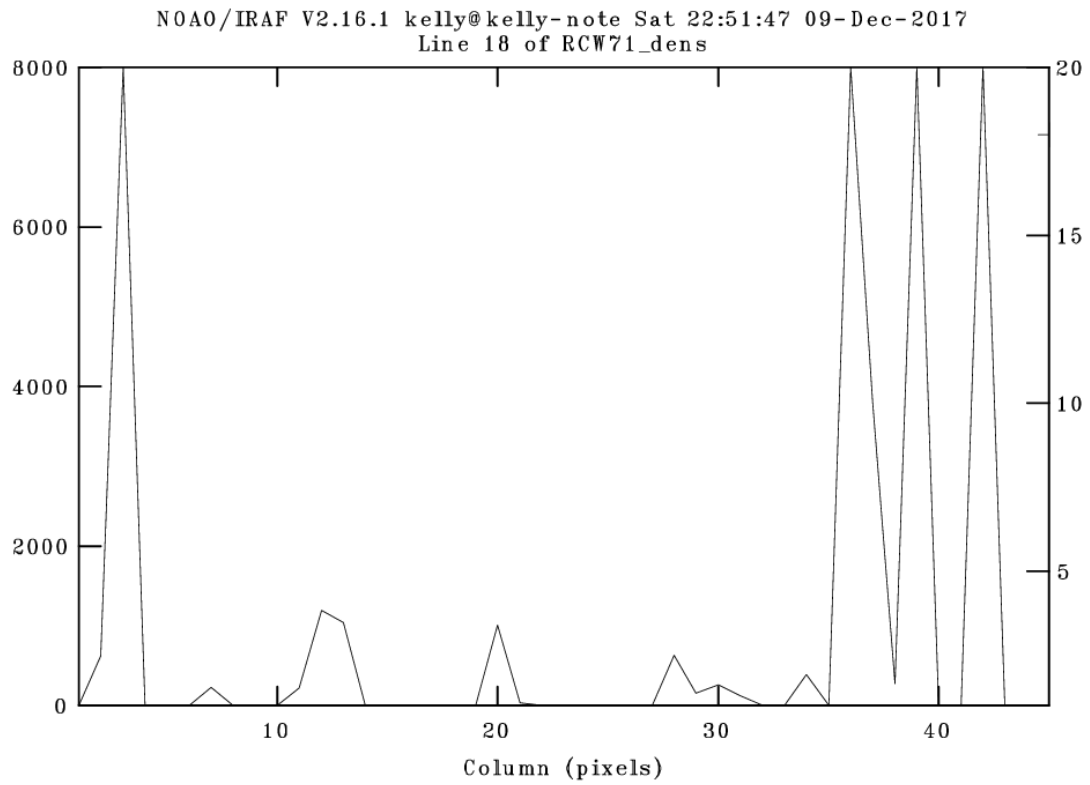


Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 11 corresponde à fenda posicionada sobre a estrela de referência ($0''$). O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado (vide Tabela 1).

Para uma melhor visualização das variações de densidade nas regiões periféricas pode-se observar a Figura 10, a qual demonstra um corte ao longo da linha 18 do mapa de densidade eletrônica que corresponde à fenda posicionada a $35''$ de distância da fenda de referência na direção Norte. Já na Tabela 2 é possível visualizar os valores encontrados para a razão das linhas [S II] e para a densidade eletrônica da região abrangida pela fenda $35''$ N.

Figura 10: Corte ao longo da linha 18 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 18 corresponde à fenda de 35" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 2: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 35'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	0,0	0	23	2,1	0
2	0,9	625	24	2,3	0
3	0,1	8000	25	3,0	0
4	0,0	0	26	1,6	0
5	0,0	0	27	2,8	0
6	0,0	0	28	0,9	635
7	1,2	225	29	1,2	158
8	0,0	0	30	1,1	265
9	4,6	0	31	1,3	128
10	0,0	0	32	1,6	0
11	1,2	217	33	1,5	0
12	0,8	1198	34	1,0	388
13	0,8	1042	35	1,9	0
14	1,5	0	36	0,4	8000
15	0,0	0	37	0,6	3823
16	1,5	0	38	1,1	277
17	2,6	0	39	0,2	8000
18	2,4	0	40	0,0	0
19	1,9	0	41	0,0	0
20	0,8	1014	42	0,2	8000
21	1,4	33	43	0,0	0
22	2,2	0	44	0,0	0
			45	0,0	0

Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das estimativas pontuais de densidade eletrônica da Região RCW 71, utilizando a razão de linhas do enxofre uma vez ionizado [S II], é possível observar que as flutuações concordam com os valores esperados para uma típica Região HII.

O mapa de densidade eletrônica mostra que o gás ionizado se expande ao longo de uma direção (Leste-Oeste) e não em todas as direções. É possível notar a presença de algum elemento que esteja bloqueando a expansão do gás ionizado ao longo da direção Norte-Sul, pois há quedas significativas de densidade eletrônica nessas regiões. Esse efeito pode ser produzido pela presença de poeira nas extremidades.

Portanto, com a estimativa ponto a ponto é possível novamente verificar que Regiões HII apresentam flutuações de densidade eletrônica, e que valores médios, em geral, não serão adequados para estudar as propriedades físicas e químicas de uma Região HII.

6 REFERÊNCIAS

- AVEDISOVA, V. S.; KONDRATENKO, G. I. **Exciting stars and the distances of the diffuse nebulae**. Nauchnye Informatsii, v. 56, p. 59, 1984.
- DANKS, A. C.; MANFROID, J.; HOUZIAUX, L. **Observations of Southern Nebulae**. Astrophysics and Space Science, v. 39, p. 307, 1976.
- FILHO, Kepler de S. O.; SARAIVA, Maria de F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 2 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.
- GUM, C. S. **A survey of southern HII regions**. Memoirs of the Royal Astronomical Society, Vol. 67, p. 155, 1955.
- OSTERBROCK, D. E.; FERLAND, G. J. **Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei**. (2nd ed.). Sausalito, California: University Science Books, p. 461, 2006.
- PROXAUF, B.; ÖTTL, S; KIMESWENGER, S. **Upgrading electron temperature and electron density diagnostic diagrams of forbidden line emission (Research Note)**. Astronomy & Astrophysics, v. 561, A10, 2014.
- RODGERS, A. W.; CAMPBELL, C. T.; WHITEOAK, J. B. **A catalogue of H α -emission regions in the southern Milky Way**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), v. 121, p.103, 1960.

APÊNDICE - Resultados

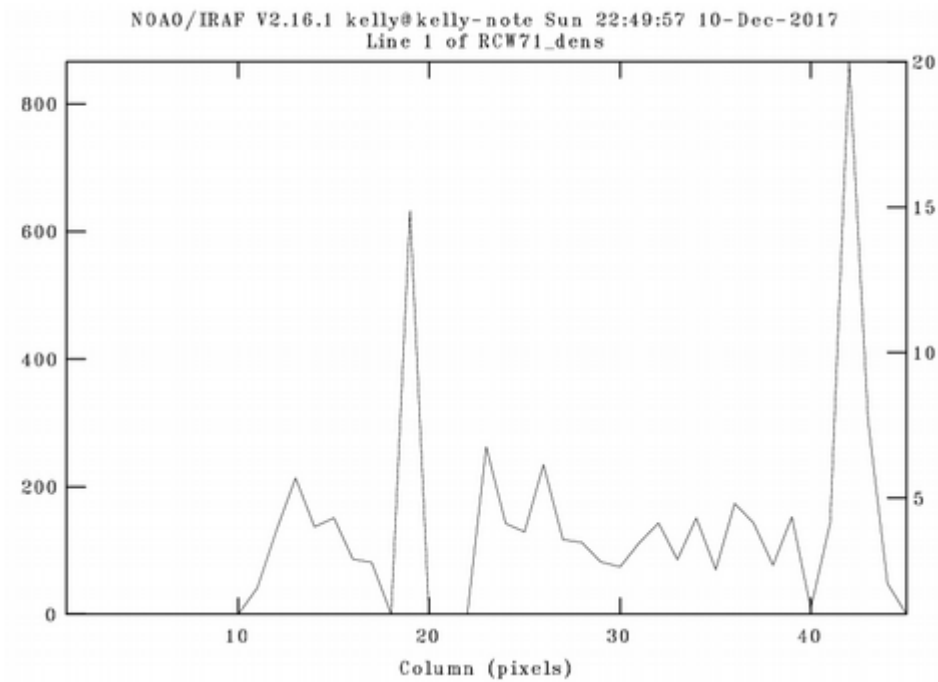
Este apêndice apresenta todos os resultados para as 20 fendas que cobrem a Região HII RCW 71, através de tabelas e figuras.

Tabela 3: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 50'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	0,0	0	23	1,1	263
2	8,6	0	24	1,2	142
3	7,7	0	25	1,3	129
4	4,5	0	26	1,1	236
5	0,0	0	27	1,3	118
6	0,0	0	28	1,3	114
7	0,0	0	29	1,3	83
8	0,0	0	30	1,3	75
9	0,0	0	31	1,3	112
10	0,0	0	32	1,2	143
11	1,4	42	33	1,3	86
12	1,2	134	34	1,2	151
13	1,2	214	35	1,3	70
14	1,2	137	36	1,2	174
15	1,2	152	37	1,2	143
16	1,3	87	38	1,3	77
17	1,3	81	39	1,2	154
18	1,4	0	40	1,4	10
19	0,9	633	41	1,2	145
20	1,9	0	42	0,8	866
21	1,9	0	43	1,1	304
22	4,3	0	44	1,4	48
			45	2,1	0

Fonte: Elaborado pela autora.

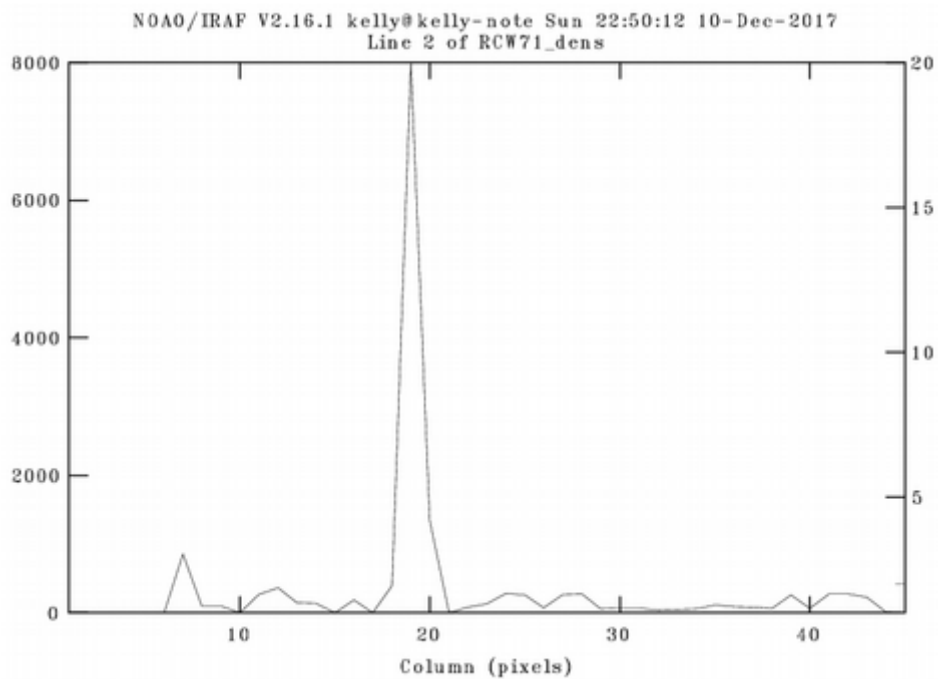
Figura 11: Corte ao longo da linha 1 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 1 corresponde à fenda de 50" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 12: Corte ao longo da linha 2 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 2 corresponde à fenda de 45" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 4: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 45'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	0,0	0	23	1,2	131
2	0,0	0	24	1,1	289
3	0,0	0	25	1,1	260
4	0,0	0	26	1,3	79
5	0,0	0	27	1,1	273
6	3,5	0	28	1,1	281
7	0,8	854	29	1,3	61
8	1,3	102	30	1,3	66
9	1,3	101	31	1,3	71
10	1,5	0	32	1,4	47
11	1,1	273	33	1,3	54
12	1,1	365	34	1,3	60
13	1,2	150	35	1,3	121
14	1,2	139	36	1,3	91
15	1,6	0	37	1,3	84
16	1,2	192	38	1,3	65
17	1,6	0	39	1,1	264
18	1,0	397	40	1,3	66
19	0,5	8000	41	1,1	275
20	0,7	1347	42	1,1	278
21	1,5	0	43	1,2	226
22	1,3	88	44	1,4	11
			45	3,5	0

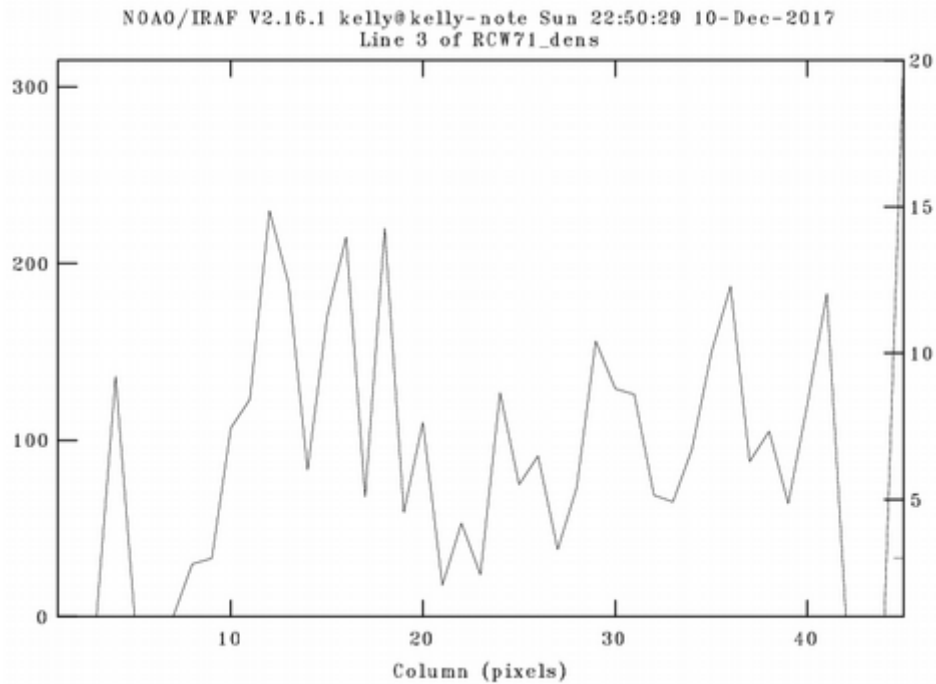
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 40'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	2,3	0	23	1,4	24
2	1,5	0	24	1,3	128
3	1,5	0	25	1,3	75
4	1,2	136	26	1,3	91
5	1,5	0	27	1,4	38
6	1,5	0	28	1,3	74
7	1,6	0	29	1,2	156
8	1,4	31	30	1,2	130
9	1,4	34	31	1,3	127
10	1,3	107	32	1,3	69
11	1,3	124	33	1,3	65
12	1,2	230	34	1,3	96
13	1,2	190	35	1,2	150
14	1,3	83	36	1,2	187
15	1,2	170	37	1,3	88
16	1,2	215	38	1,3	105
17	1,3	69	39	1,3	65
18	1,2	220	40	1,3	120
19	1,3	60	41	1,2	183
20	1,3	111	42	1,6	0
21	1,4	18	43	1,5	0
22	1,3	54	44	1,5	0
			45	1,1	315

Fonte: Elaborado pela autora.

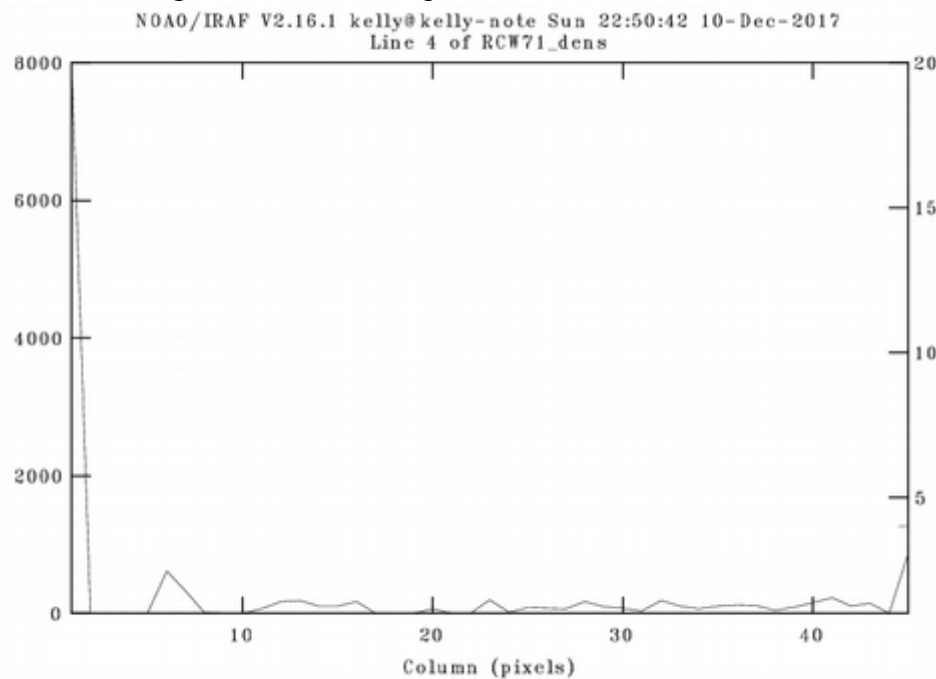
Figura 13: Corte ao longo da linha 3 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 3 corresponde à fenda de 40" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 14: Corte ao longo da linha 4 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

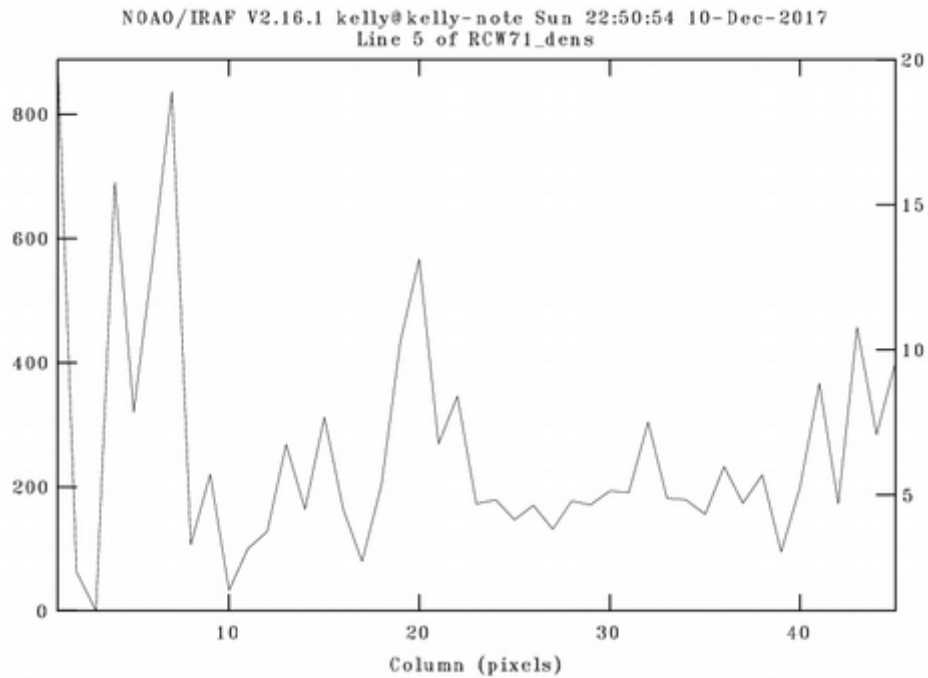
Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 4 corresponde à fenda de 35" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 6: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 35'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	0,2	8000	23	1,2	194
2	0,0	0	24	1,4	23
3	0,0	0	25	1,3	81
4	0,0	0	26	1,3	75
5	0,0	0	27	1,3	67
6	0,9	619	28	1,2	176
7	1,1	329	29	1,3	100
8	1,4	13	30	1,3	78
9	1,4	7	31	1,4	40
10	1,5	0	32	1,2	188
11	1,3	70	33	1,3	111
12	1,2	176	34	1,3	69
13	1,2	186	35	1,3	107
14	1,3	112	36	1,3	123
15	1,3	112	37	1,3	120
16	1,2	171	38	1,4	46
17	1,7	0	39	1,3	96
18	1,8	0	40	1,2	159
19	1,7	0	41	1,2	226
20	1,3	69	42	1,3	110
21	1,5	0	43	1,2	145
22	1,5	0	44	1,4	1
			45	0,8	866

Fonte: Elaborado pela autora.

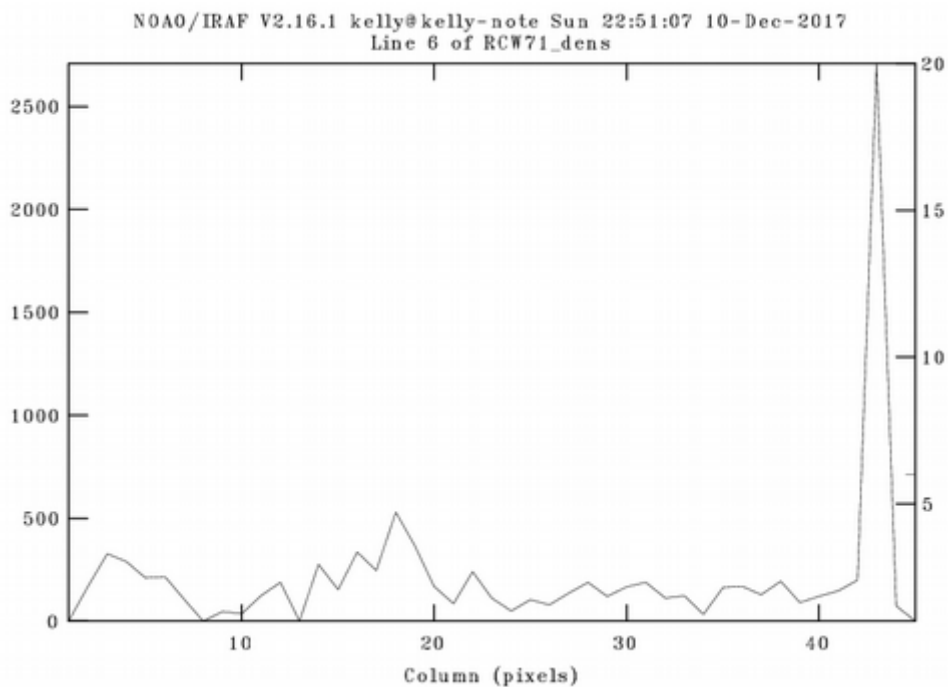
Figura 15: Corte ao longo da linha 5 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 5 corresponde à fenda de 30" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 16: Corte ao longo da linha 6 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 6 corresponde à fenda de 25" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 7: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 30'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	0,8	888	23	1,2	173
2	1,3	64	24	1,2	179
3	1,5	0	25	1,2	148
4	0,9	691	26	1,2	171
5	1,1	321	27	1,2	133
6	0,9	571	28	1,2	178
7	0,8	837	29	1,2	171
8	1,3	107	30	1,2	193
9	1,2	220	31	1,2	192
10	1,4	33	32	1,1	305
11	1,3	101	33	1,2	183
12	1,3	128	34	1,2	180
13	1,1	269	35	1,2	156
14	1,2	165	36	1,2	234
15	1,1	312	37	1,2	174
16	1,2	165	38	1,2	220
17	1,3	80	39	1,3	95
18	1,2	204	40	1,2	201
19	1,0	435	41	1,1	367
20	0,9	568	42	1,2	174
21	1,1	269	43	1,0	457
22	1,1	347	44	1,1	285
			45	1,0	401

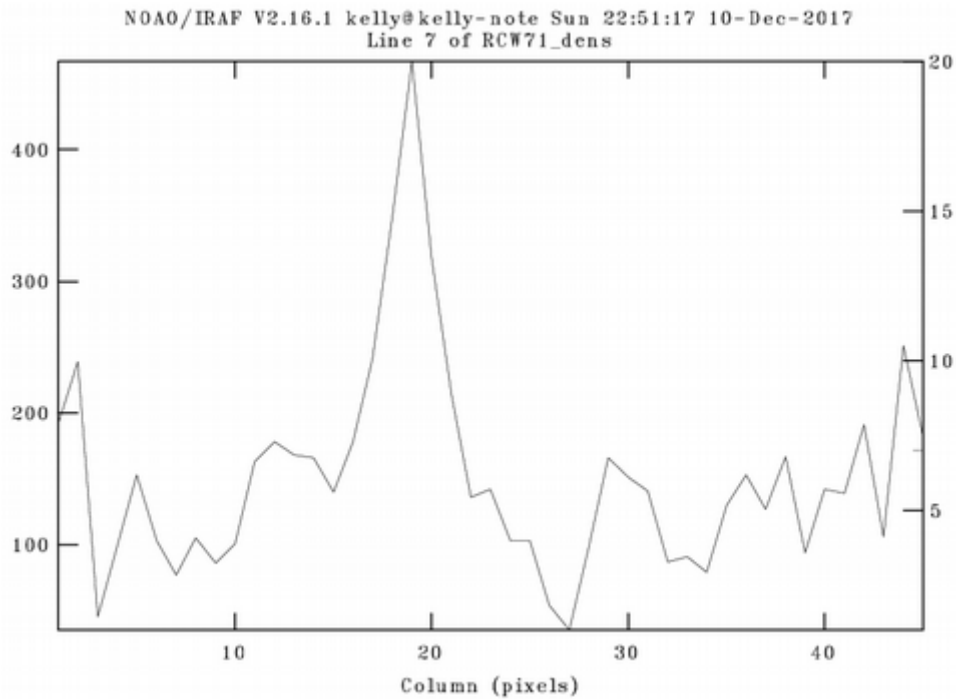
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 25" da fenda de referência (0") na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	0,0	0	23	1,3	115
2	1,2	167	24	1,4	51
3	1,1	328	25	1,3	105
4	1,1	289	26	1,3	81
5	1,2	212	27	1,2	137
6	1,2	217	28	1,2	190
7	1,3	107	29	1,3	122
8	1,5	0	30	1,2	169
9	1,4	48	31	1,2	191
10	1,4	37	32	1,3	115
11	1,3	124	33	1,3	125
12	1,2	189	34	1,4	36
13	1,4	3	35	1,2	164
14	1,1	277	36	1,2	169
15	1,2	155	37	1,3	128
16	1,1	337	38	1,2	195
17	1,1	246	39	1,3	91
18	1,0	531	40	1,3	122
19	1,1	365	41	1,2	149
20	1,2	171	42	1,2	200
21	1,3	86	43	0,6	2708
22	1,1	242	44	1,3	75
			45	1,6	0

Fonte: Elaborado pela autora.

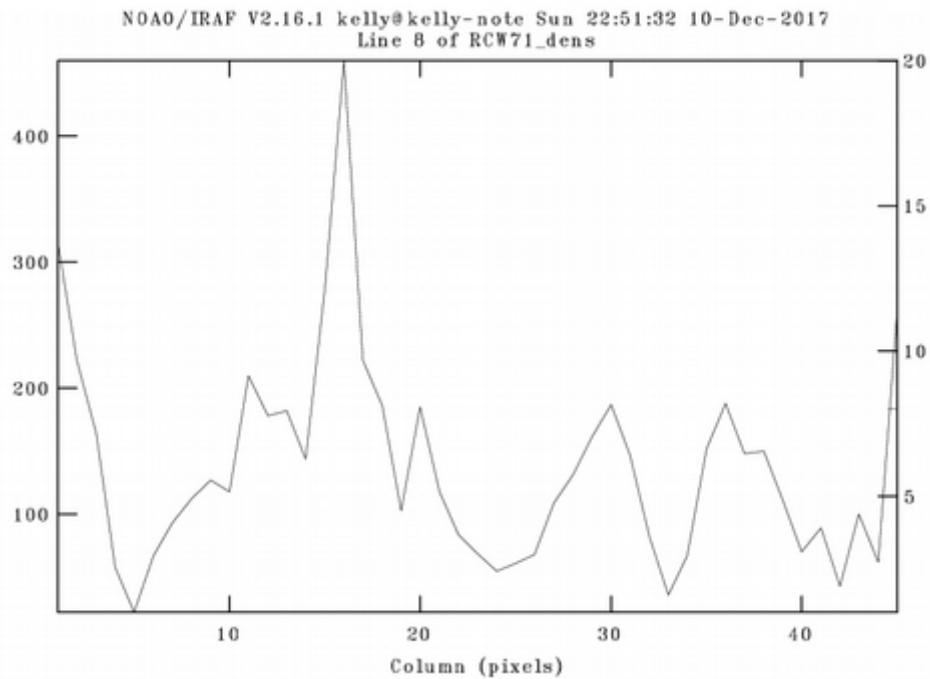
Figura 17: Corte ao longo da linha 7 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 7 corresponde à fenda de 20" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 18: Corte ao longo da linha 8 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 8 corresponde à fenda de 15" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 9: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 20" da fenda de referência (0") na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,2	192	23	1,2	142
2	1,1	240	24	1,3	104
3	1,4	45	25	1,3	104
4	1,3	100	26	1,3	54
5	1,2	154	27	1,4	35
6	1,3	103	28	1,3	98
7	1,3	78	29	1,2	167
8	1,3	105	30	1,2	152
9	1,3	86	31	1,2	142
10	1,3	102	32	1,3	87
11	1,2	164	33	1,3	92
12	1,2	179	34	1,3	80
13	1,2	168	35	1,2	131
14	1,2	166	36	1,2	154
15	1,2	140	37	1,3	128
16	1,2	179	38	1,2	167
17	1,1	241	39	1,3	94
18	1,1	351	40	1,2	143
19	1,0	468	41	1,2	139
20	1,1	320	42	1,2	192
21	1,2	215	43	1,3	107
22	1,2	137	44	1,1	252
			45	1,2	183

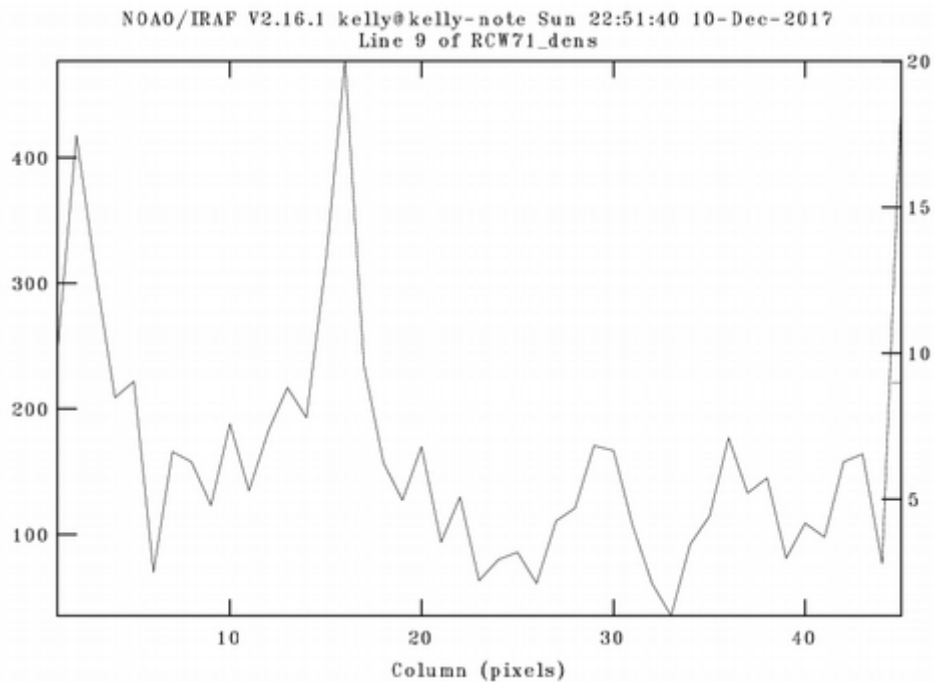
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 15'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,1	316	23	1,3	70
2	1,2	222	24	1,3	55
3	1,2	165	25	1,3	62
4	1,3	58	26	1,3	68
5	1,4	22	27	1,3	109
6	1,3	68	28	1,2	131
7	1,3	94	29	1,2	162
8	1,3	112	30	1,2	188
9	1,3	128	31	1,2	147
10	1,3	118	32	1,3	83
11	1,2	211	33	1,4	37
12	1,2	179	34	1,3	68
13	1,2	183	35	1,2	152
14	1,2	145	36	1,2	188
15	1,1	282	37	1,2	149
16	1,0	461	38	1,2	151
17	1,2	222	39	1,3	112
18	1,2	187	40	1,3	71
19	1,3	104	41	1,3	89
20	1,2	186	42	1,4	44
21	1,3	118	43	1,3	101
22	1,3	85	44	1,3	63
			45	1,1	263

Fonte: Elaborado pela autora.

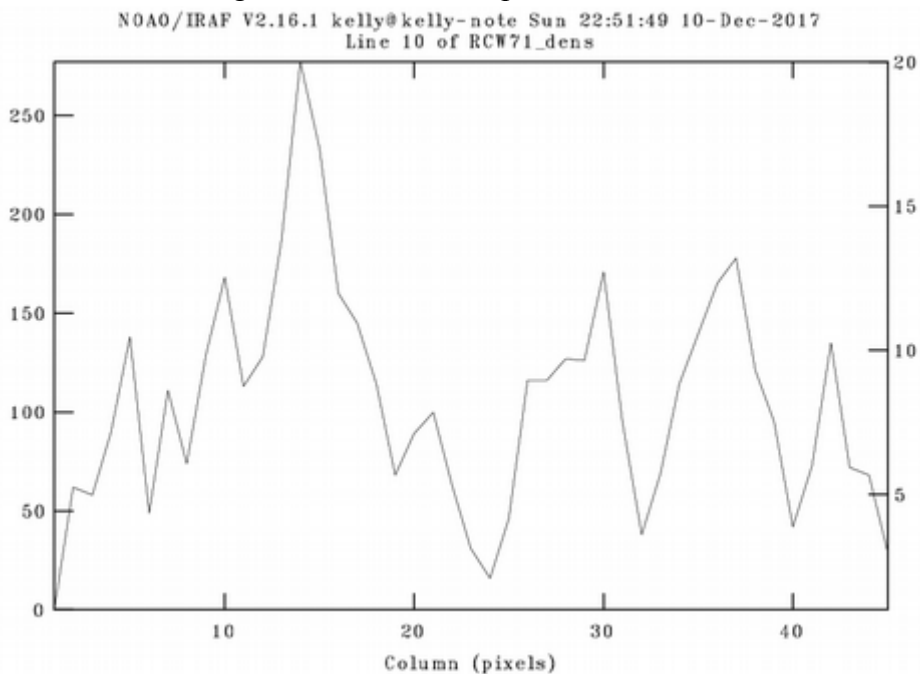
Figura 19: Corte ao longo da linha 9 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 9 corresponde à fenda de 10" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 20: Corte ao longo da linha 10 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 10 corresponde à fenda de 5" S com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 11: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 10'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,1	246	23	1,3	64
2	1,0	418	24	1,3	80
3	1,1	307	25	1,3	87
4	1,2	210	26	1,3	62
5	1,2	223	27	1,3	112
6	1,3	71	28	1,3	122
7	1,2	166	29	1,2	171
8	1,2	159	30	1,2	167
9	1,3	124	31	1,3	107
10	1,2	188	32	1,3	62
11	1,2	135	33	1,4	36
12	1,2	183	34	1,3	93
13	1,2	218	35	1,3	116
14	1,2	194	36	1,2	178
15	1,1	318	37	1,2	133
16	1,0	478	38	1,2	145
17	1,1	235	39	1,3	81
18	1,2	157	40	1,3	109
19	1,3	127	41	1,3	98
20	1,2	171	42	1,2	159
21	1,3	95	43	1,2	165
22	1,2	131	44	1,3	78
			45	1,0	444

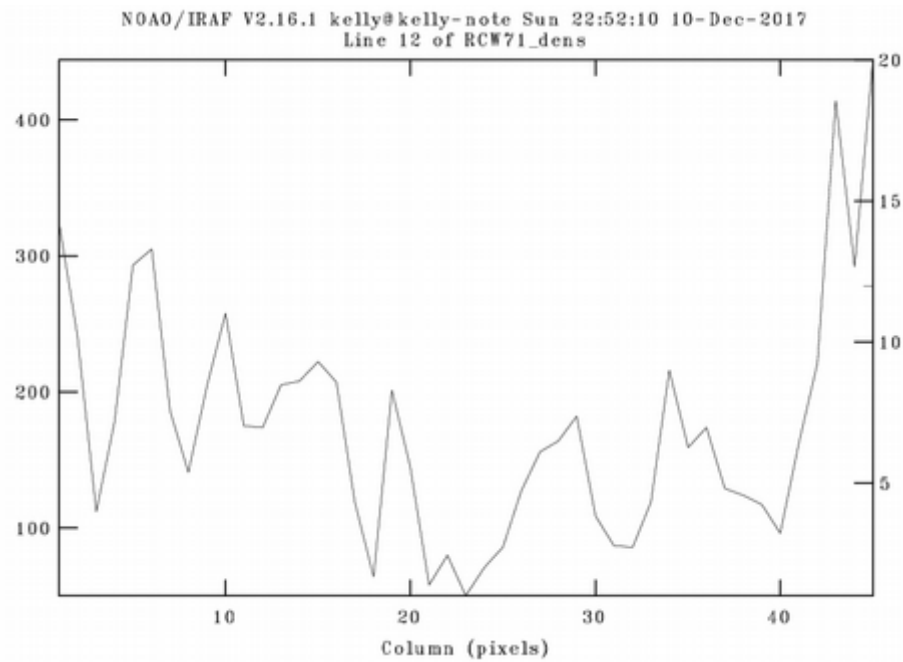
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 12: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 5'' da fenda de referência (0'') na direção Sul

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,4	0	23	1,4	32
2	1,3	62	24	1,4	16
3	1,3	59	25	1,4	46
4	1,3	90	26	1,3	116
5	1,2	139	27	1,3	116
6	1,4	50	28	1,3	128
7	1,3	111	29	1,3	126
8	1,3	74	30	1,2	171
9	1,3	129	31	1,3	96
10	1,2	169	32	1,4	38
11	1,3	113	33	1,3	69
12	1,3	128	34	1,3	114
13	1,2	188	35	1,2	140
14	1,1	278	36	1,2	166
15	1,2	233	37	1,2	178
16	1,2	160	38	1,3	122
17	1,2	146	39	1,3	96
18	1,3	114	40	1,4	42
19	1,3	69	41	1,3	74
20	1,3	89	42	1,2	136
21	1,3	101	43	1,3	73
22	1,3	64	44	1,3	68
			45	1,4	29

Fonte: Elaborado pela autora.

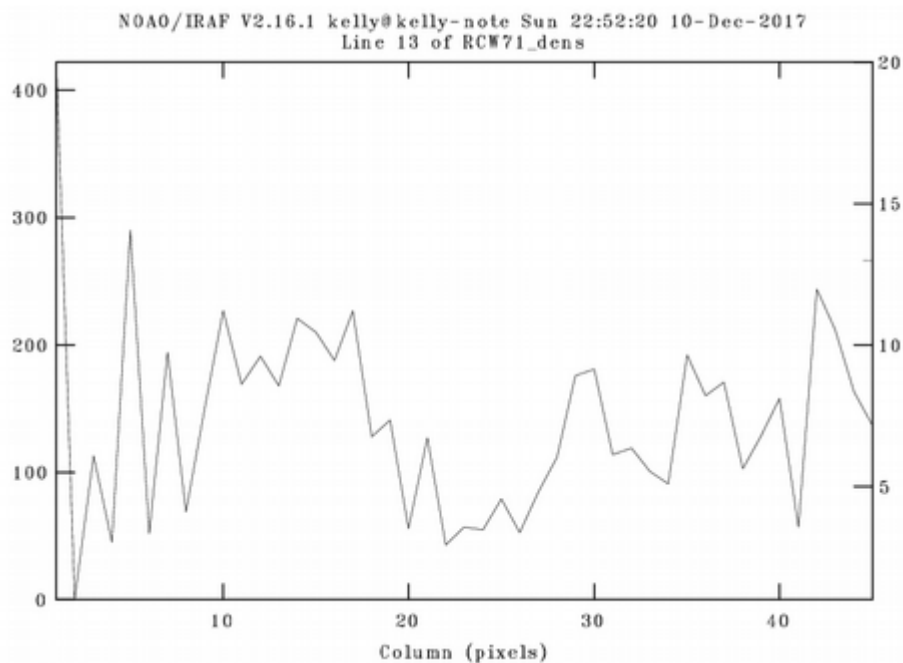
Figura 21: Corte ao longo da linha 12 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 12 corresponde à fenda de 5" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 22: Corte ao longo da linha 13 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 13 corresponde à fenda de 10" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 13: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 5'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,1	325	23	1,4	50
2	1,1	242	24	1,3	72
3	1,3	112	25	1,3	87
4	1,2	178	26	1,3	128
5	1,1	293	27	1,2	157
6	1,1	305	28	1,2	165
7	1,2	187	29	1,2	182
8	1,2	141	30	1,3	110
9	1,2	206	31	1,3	88
10	1,1	258	32	1,3	87
11	1,2	176	33	1,3	120
12	1,2	175	34	1,2	216
13	1,2	205	35	1,2	160
14	1,2	208	36	1,2	175
15	1,2	222	37	1,3	130
16	1,2	208	38	1,3	125
17	1,3	119	39	1,3	118
18	1,3	65	40	1,3	97
19	1,2	201	41	1,2	164
20	1,2	146	42	1,2	222
21	1,3	58	43	1,0	415
22	1,3	81	44	1,1	292
			45	1,0	444

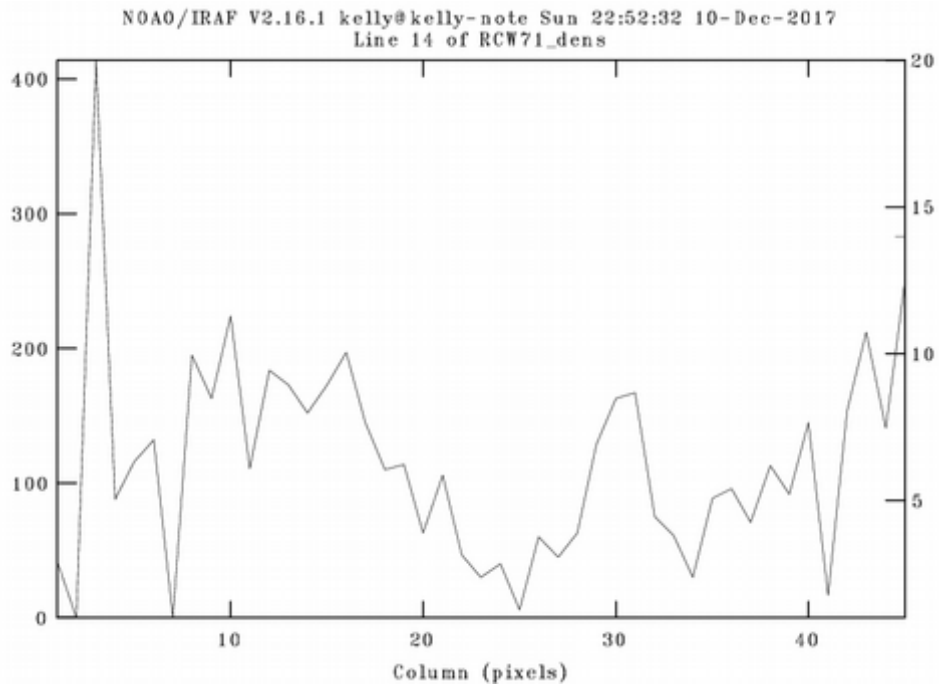
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 14: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 10'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,0	423	23	1,3	58
2	1,5	0	24	1,3	56
3	1,3	113	25	1,3	79
4	1,4	45	26	1,3	54
5	1,1	291	27	1,3	85
6	1,4	53	28	1,3	113
7	1,2	194	29	1,2	176
8	1,3	70	30	1,2	181
9	1,2	152	31	1,3	115
10	1,2	227	32	1,3	119
11	1,2	169	33	1,3	101
12	1,2	191	34	1,3	92
13	1,2	168	35	1,2	192
14	1,2	221	36	1,2	161
15	1,2	211	37	1,2	172
16	1,2	189	38	1,3	104
17	1,2	227	39	1,3	129
18	1,3	129	40	1,2	158
19	1,2	142	41	1,3	57
20	1,3	57	42	1,1	245
21	1,3	128	43	1,2	212
22	1,4	44	44	1,2	164
			45	1,2	137

Fonte: Elaborado pela autora.

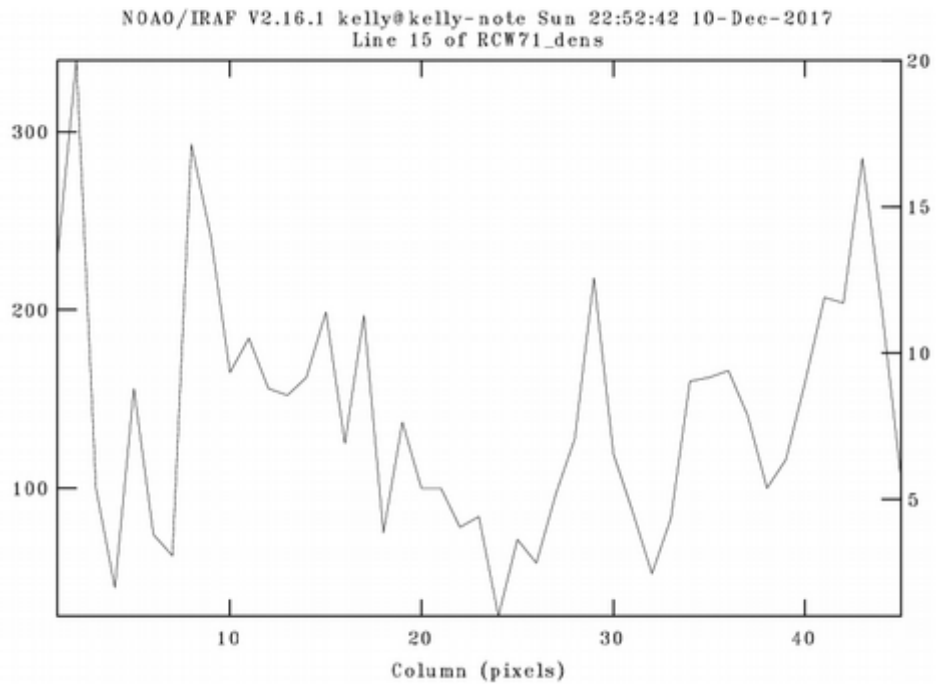
Figura 23: Corte ao longo da linha 14 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 14 corresponde à fenda de 15" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 24: Corte ao longo da linha 15 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 15 corresponde à fenda de 20" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 15: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 15'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,4	42	23	1,4	31
2	1,6	0	24	1,4	40
3	1,0	415	25	1,4	7
4	1,3	89	26	1,3	60
5	1,3	117	27	1,4	46
6	1,2	133	28	1,3	64
7	1,4	0	29	1,3	129
8	1,2	195	30	1,2	164
9	1,2	164	31	1,2	167
10	1,2	225	32	1,3	76
11	1,3	112	33	1,3	62
12	1,2	184	34	1,4	30
13	1,2	174	35	1,3	90
14	1,2	153	36	1,3	97
15	1,2	173	37	1,3	71
16	1,2	197	38	1,3	114
17	1,2	145	39	1,3	92
18	1,3	111	40	1,2	145
19	1,3	114	41	1,4	18
20	1,3	64	42	1,2	155
21	1,3	106	43	1,2	213
22	1,4	48	44	1,2	142
			45	1,1	251

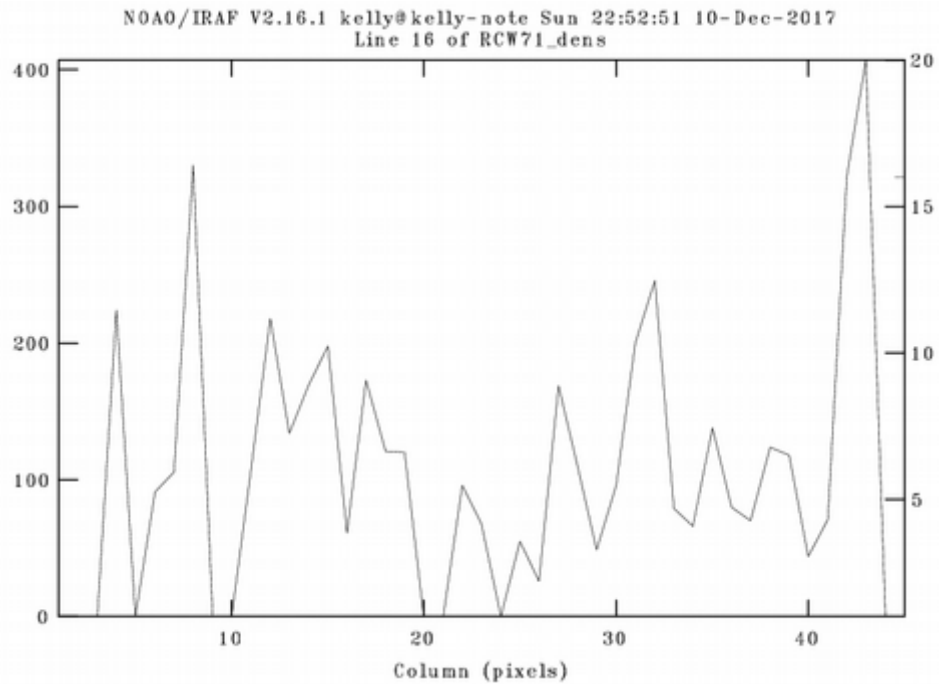
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 16: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 20" da fenda de referência (0") na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	1,2	230	23	1,3	84
2	1,1	340	24	1,4	29
3	1,3	101	25	1,3	71
4	1,4	44	26	1,3	58
5	1,2	156	27	1,3	98
6	1,3	75	28	1,3	129
7	1,3	63	29	1,2	219
8	1,1	293	30	1,3	119
9	1,1	242	31	1,3	87
10	1,2	166	32	1,4	53
11	1,2	184	33	1,3	83
12	1,2	157	34	1,2	161
13	1,2	153	35	1,2	162
14	1,2	162	36	1,2	166
15	1,2	200	37	1,2	141
16	1,3	126	38	1,3	100
17	1,2	197	39	1,3	117
18	1,3	75	40	1,2	159
19	1,2	137	41	1,2	207
20	1,3	100	42	1,2	204
21	1,3	101	43	1,1	285
22	1,3	78	44	1,2	201
			45	1,3	106

Fonte: Elaborado pela autora.

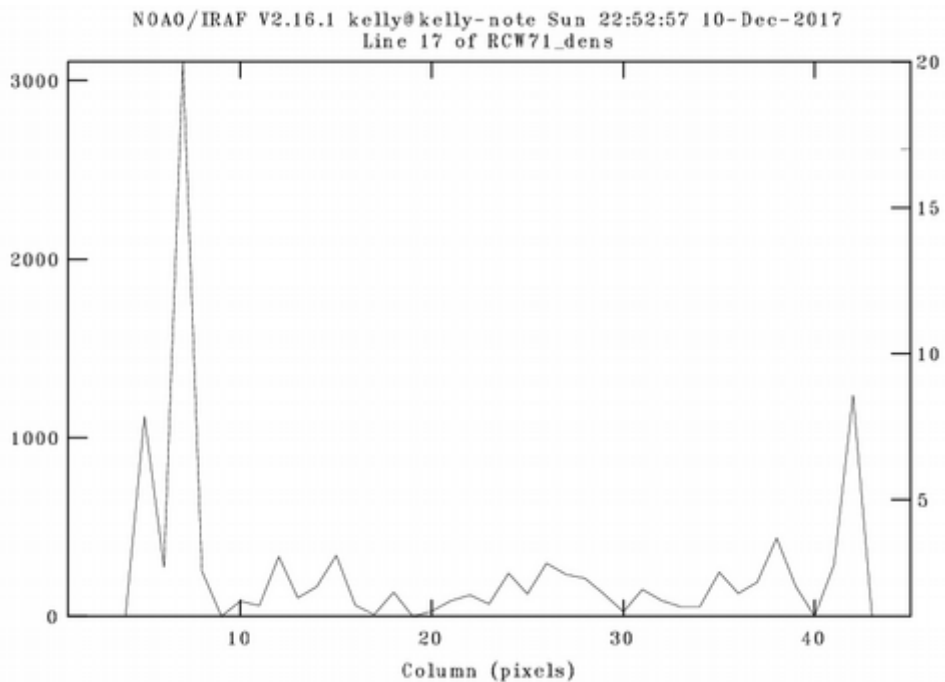
Figura 25: Corte ao longo da linha 16 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 16 corresponde à fenda de 25" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 26: Corte ao longo da linha 17 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 17 corresponde à fenda de 30" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 17: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 25'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	2,8	0	23	1,3	69
2	2,8	0	24	1,4	0
3	3,4	0	25	1,3	55
4	1,2	225	26	1,4	27
5	1,7	0	27	1,2	169
6	1,3	92	28	1,3	110
7	1,3	106	29	1,4	49
8	1,1	331	30	1,3	96
9	1,7	0	31	1,2	200
10	1,6	0	32	1,1	247
11	1,3	107	33	1,3	80
12	1,2	218	34	1,3	67
13	1,2	134	35	1,2	138
14	1,2	170	36	1,3	80
15	1,2	198	37	1,3	70
16	1,3	62	38	1,3	125
17	1,2	173	39	1,3	118
18	1,3	122	40	1,4	45
19	1,3	120	41	1,3	72
20	1,6	0	42	1,1	323
21	1,5	0	43	1,0	407
22	1,3	97	44	2,6	0
			45	1,9	0

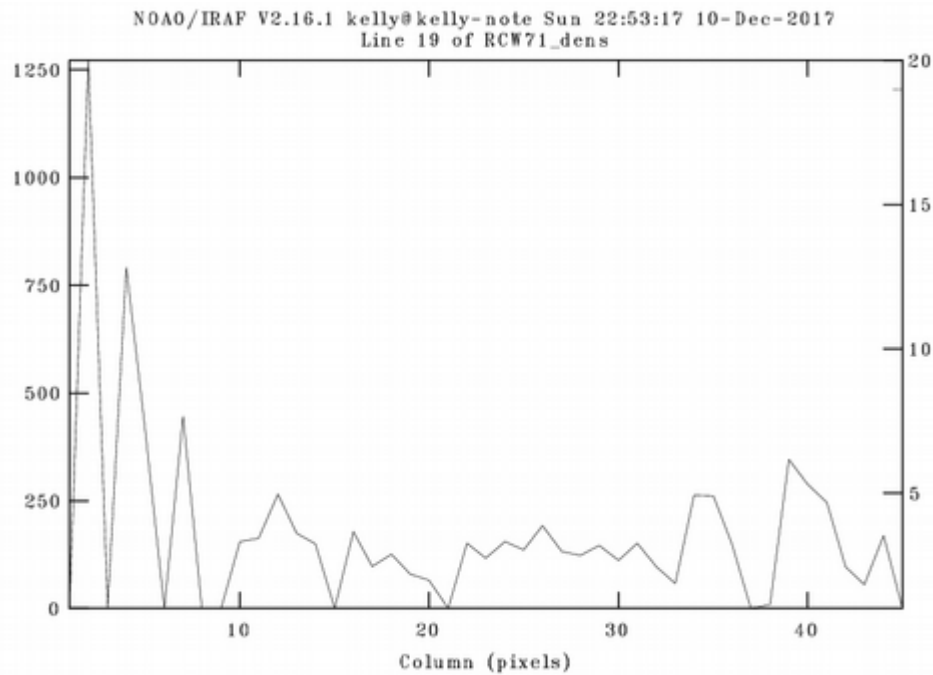
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 18: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 30'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	0,0	0	23	1,3	71
2	0,0	0	24	1,1	244
3	2,5	0	25	1,3	125
4	2,2	0	26	1,1	300
5	0,8	1121	27	1,1	237
6	1,1	275	28	1,2	216
7	0,6	3107	29	1,3	128
8	1,1	254	30	1,4	27
9	0,0	0	31	1,2	150
10	1,3	87	32	1,3	89
11	1,3	60	33	1,4	53
12	1,1	336	34	1,3	57
13	1,3	107	35	1,1	247
14	1,2	167	36	1,3	129
15	1,1	343	37	1,2	192
16	1,3	64	38	1,0	440
17	1,4	12	39	1,2	170
18	1,2	136	40	1,5	0
19	1,5	0	41	1,1	292
20	1,4	30	42	0,7	1239
21	1,3	90	43	1,7	0
22	1,3	119	44	3,1	0
			45	7,4	0

Fonte: Elaborado pela autora.

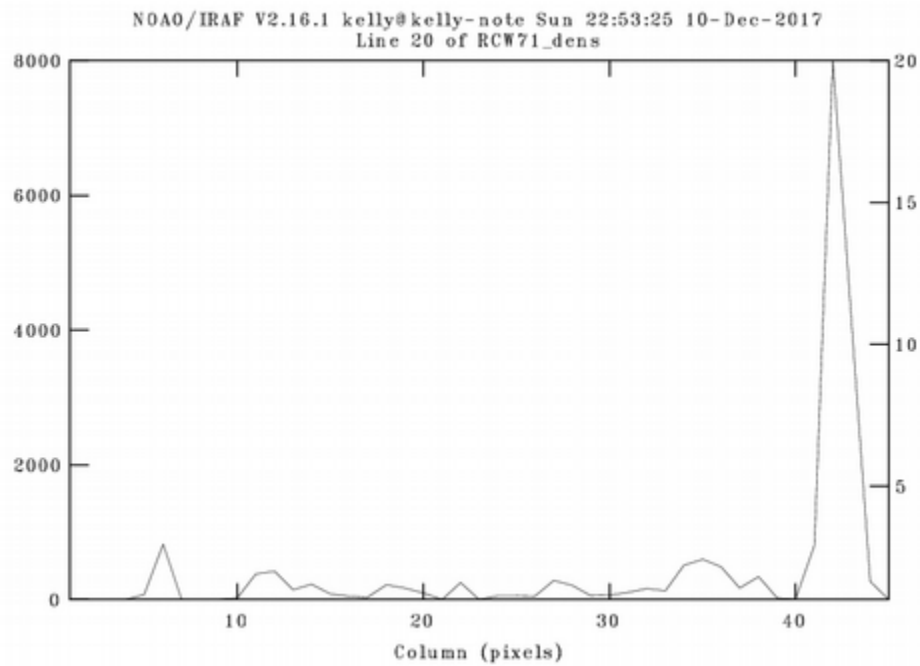
Figura 27: Corte ao longo da linha 19 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 19 corresponde à fenda de 40" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Figura 28: Corte ao longo da linha 20 do mapa de densidade eletrônica RCW 71.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota: No sistema de coordenadas a direção norte está para cima e a direção leste para a esquerda. A linha 20 corresponde à fenda de 50" N com relação à fenda de referência. O eixo vertical à esquerda corresponde ao valor de densidade eletrônica encontrado.

Tabela 19: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 40'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	2,4	0	23	1,3	117
2	0,7	1273	24	1,2	156
3	1,5	0	25	1,2	137
4	0,8	792	26	1,2	192
5	1,0	416	27	1,2	133
6	1,7	0	28	1,3	124
7	1,0	447	29	1,2	146
8	1,6	0	30	1,3	113
9	1,5	0	31	1,2	153
10	1,2	156	32	1,3	97
11	1,2	164	33	1,3	58
12	1,1	266	34	1,1	264
13	1,2	175	35	1,1	263
14	1,2	150	36	1,2	149
15	1,5	0	37	1,5	0
16	1,2	180	38	1,4	9
17	1,3	98	39	1,1	346
18	1,3	127	40	1,1	289
19	1,3	81	41	1,1	246
20	1,3	66	42	1,3	97
21	1,5	0	43	1,3	56
22	1,2	152	44	1,2	170
			45	7,7	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 20: Razão das linhas [S II] e densidade eletrônica da região correspondente a fenda posicionada à 45'' da fenda de referência (0'') na direção Norte

Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)	Abertura	Razão das linhas [S II]	Densidade eletrônica (cm ⁻³)
1	6,1	0	23	2,1	0
2	3,8	0	24	1,3	56
3	0,0	0	25	1,3	62
4	1,5	0	26	1,4	48
5	1,3	79	27	1,1	288
6	0,8	822	28	1,2	210
7	1,9	0	29	1,3	59
8	2,4	0	30	1,3	69
9	1,6	0	31	1,3	108
10	1,4	31	32	1,2	167
11	1,0	379	33	1,2	137
12	1,0	418	34	1,0	510
13	1,2	148	35	0,9	602
14	1,2	229	36	1,0	487
15	1,3	85	37	1,2	177
16	1,4	48	38	1,1	345
17	1,4	38	39	1,4	31
18	1,2	217	40	2,2	0
19	1,2	172	41	0,8	808
20	1,3	103	42	0,3	8000
21	1,5	0	43	0,6	4178
22	1,1	255	44	1,1	270
			45	0,0	0

Fonte: Elaborado pela autora.