

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
Programa de Pós Graduação em Física e Astronomia

ALEXANDRE JOSÉ DE OLIVEIRA E SILVA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE BRILHO NOS POLOS DO SOL EM
RÁDIO E EM ULTRAVIOLETA**

São José dos Campos - SP

2015

ALEXANDRE JOSÉ DE OLIVEIRA E SILVA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE BRILHO NOS POLOS DO SOL EM
RÁDIO E EM ULTRAVIOLETA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para a obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Caius Lucius Selhorst

São José dos Campos - SP

2015

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Oliveira e Silva, Alexandre José de
Análise da variação de brilho nos polos do sol em rádio e em ultravioleta / Alexandre José de Oliveira e Silva; orientador, Caius Lucius Selhorst. - São José dos Campos, SP, 2015.
1 CD-ROM, 96 p.

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

Inclui referências

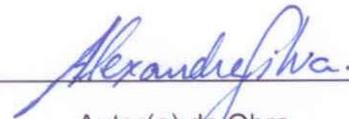
1. Física e Astronomia. 2. Abrilhamento de Limbo. 3. Cromosfera. I. Selhorst, Caius Lucius, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. III. Título.

Eu, Alexandre José de Oliveira e Silva, autor(a) da obra acima referenciada:

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

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

São José dos Campos, 22 de Julho de 2015.



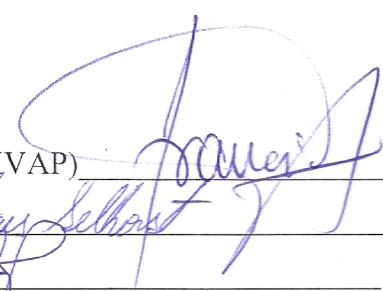
Autor(a) da Obra

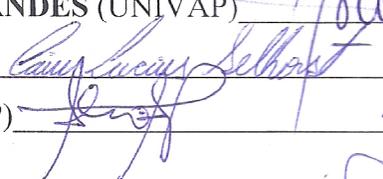
Data da defesa: 26 / 02 / 2015

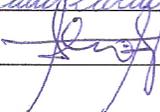
ALEXANDRE JOSÉ DE OLIVEIRA E SILVA

“EFEITO DA VARIAÇÃO DE BRILHO NOS POLOS DO SOL EM RÁDIO E ULTRAVIOLETA.”

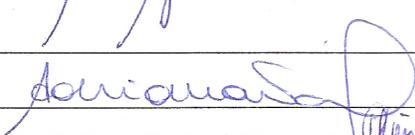
Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Física e Astronomia, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

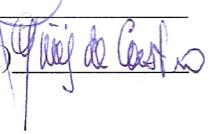
Prof. Dr. FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNANDES (UNIVAP) 

Prof. Dr. CAIUS LUCIUS SELHORST (UNIVAP) 

Prof^a. Dra. ALESSANDRA ABE PACINI (UNIVAP) 

Prof. Dr. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ (UNIVAP)

Prof^a. Dra. ADRIANA VÁLIO (UPM/ CRAAM) 

Prof. Dr. CARLOS GUILHERMO GIMÉNEZ DE CASTRO (UPM/ CRAAM) 

Prof^a. Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa

Diretor do IP&D – UniVap

São José dos Campos, 24 de fevereiro de 2015.

Ao cientista só é imposta duas obrigoriedades: a verdade e a sinceridade.
ERWIN SCHRÖDINGER (1887 — 1961)

Aos meus pais, que na simplicidade de suas vidas eternizaram em mim:
o respeito, a educação, a humildade e a bondade;
Aos meus familiares e amigos pelo incentivo;
À minha esposa e às minhas filhas;

AGRADECIMENTOS

Ao Doutor Caius Lucius Selhorst, por ter me orientado, com competência e sabedoria, neste trabalho. Pela sua paciência e amizade no decorrer de nossos estudos.

À professora Dra. Alessandra Abe Pacini, à professora Dra. Adriana Válio, ao professor Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes, ao professor Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro e ao professor Dr. Arian Ojeda González, membros da banca, pela colaboração e sugestões a este trabalho.

Ao professor Msc Geraldo Tibúrcio de Almeida e Silva (UFSJ), pelas sugestões e colaboração nas correções gramaticais e ortográficas desse trabalho.

Ao Rádio Heliógrafo de Nobeyama (NoRH), operado pelo Observatório NAOJ / Nobeyama Solar Radio, pela disponibilização dos mapas solares em 17 GHz que foram utilizados nesse trabalho.

Ao SOHO, um projeto de internacional colaboração entre a ESA e a NASA e ao SDO/NASA (Solar Dynamics Observatory), pela disponibilização das imagens do Sol em extremo ultravioleta.

Ao IP&D - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento e à UNIVAP - Universidade do Vale do Paraíba pela disponibilização de suas instalações e recursos para a realização desse trabalho.

Agradeço pelo suporte financeiro à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Valeparaibana de Ensino (FVE).

Aos amigos que me ajudaram durante a elaboração do trabalho e pelo auxílio técnico.

Em especial, aos meus familiares que sempre deram suporte e me apoiaram no decorrer de toda minha jornada.

E, a Deus, sobre tudo !

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE BRILHO NOS POLOS DO SOL EM RÁDIO E EM ULTRAVIOLETA

RESUMO

Neste trabalho, é analisada a variação temporal do abrilhantamento de limbo nas regiões polares do Sol em rádio (17 GHz) e sua relação com o brilho médio polar observado em três comprimentos de onda em EUV (171 Å, 304 Å e 1600 Å). Para a análise em 17 GHz, foram usados mapas diários obtidos pelo NoRH (*Nobeyama Radioheliograph*) entre julho/1992 e junho/2014. Em EUV, as imagens foram obtidas do telescópio AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*), a bordo do satélite SDO (*Solar Dynamics Observatory*), lançado em 2010. Como a emissão observada em 17 GHz é formada em sua maior parte na cromosfera solar, foram selecionados para a análise em EUV comprimentos de onda formados entre a cromosfera e a região de transição (304 Å, 1600 Å) e um tipicamente coronal (171 Å). O trabalho envolveu duas metodologias distintas: a primeira é o estudo do comportamento das regiões localizadas nas latitudes de $\pm 60^\circ$ nos polos do Sol, levando em consideração a variação da inclinação do eixo de rotação do Sol em relação ao plano da eclíptica (B_0); a segunda é a elaboração de mapas sinópticos ao redor do limbo solar em um limite de 100" inferior ao raio solar. Os resultados de ambas as análises mostraram: a) redução do brilho polar médio em 17 GHz e da contribuição de estruturas compactas quentes, acima de 1,2 sc (sol calmo), durante o mínimo de atividade solar entre os ciclos 23 e 24; b) redução do brilho médio polar em 17 GHz, 1600 Å e 304 Å com o aumento da atividade no equador solar, enquanto que em 171 Å apresentou aumento da emissão durante o mesmo período; c) o abrilhantamento polar característico da emissão em 17 GHz também foi observado em 1600 Å, porém com pequenas diferenças na distribuição angular e d) correlação entre a presença de buracos coronais nos polos em 171 Å e o aumento do brilho polar em 17 GHz.

Palavras Chave: Sol: abrilhantamento de limbo; Sol: cromosfera; EUV; ciclo solar

ANALYSIS OF THE BRIGHTNESS VARIATION OF THE SOLAR POLES AT RADIO AND ULTRAVIOLET

ABSTRACT

In this work, the temporal variation of the limb brightening is analyzed in the polar regions of the Sun in radio (17 GHz) and its correlation with mean polar brightness at EUV (171 Å, 304 Å e 1600 Å). Maps at 17 GHz obtained from the studied Nobeyama Radioheliograph (NoRH) between 1992 July and 2014 December. The EUV images were obtained from Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on board SDO spacecraft (Solar Dynamics Observatory) launched in 2010. As the emission observed at 17 GHz is formed mostly in the solar chromosphere, the EUV wavelengths formed between the chromosphere and transition region (304 Å e 1600 Å) were selected together with a typically coronal one (171 Å). We used two different methodologies: the first is the study of the behavior of the regions located in latitudes above $\pm 60^\circ$ at the solar poles, it takes into account the variation B_0 angle; the second is the drafting of synoptic graphics around the solar limb in a limit of 100'' below the solar radius. The results from both analyzes showed: a) reduction in the average polar brightness at 17 GHz and the contribution of hot compact structures, above 1.2 sc (quiet sun) during minimum of solar activity between cycles 23:24; b) the mean polar bright observed at 17 GHz, 1600 Å and 304 Å reduced their intensities with the increment of the solar activity, on the other band, the results at 171 Å showed an increase in its emission during the same period; c) the polar brightening that characterize the 17 GHz emission, is also observed at 1600 Å, however, there are small differences in their angular distribution and d) correlation between the presence of coronal holes at the poles in 171 Å and increasing the polar brightness in 17 GHz.

Key words: Sun: general - Sun: limb brightening, Sun: chromosphere; EUV; solar cycle

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1	Representação da estrutura solar: interior e atmosfera	15
2	Representação da zona de convecção solar	16
3	Temperatura e densidade da atmosfera solar	17
4	a) Imagem da fotosfera solar registrada em 4500 Å pelo SDO/AIA em 07/01/2014 e b) Imagem da cromosfera solar vista no eclipse solar de 11/08/1999	18
5	Sobreposição de imagens da coroa solar de diversas linhas de emissão	19
6	Campo magnético do Sol	20
7	Tubo de fluxo magnético na superfície solar	21
8	Região ativa NOAA 11944 em a) luz branca, b) 17 GHz e c) 304 Å	23
9	a) Diagrama da borboleta e b) média diária das manchas solares durante os ciclos de atividades	23
10	Fáculas solares	24
11	Buracos coronais observados em EUV (193 Å) pelo SDO/AIA em 02/02/2011	25
12	<i>Nobeyama Radioheliograph</i> (NoRH)	29
13	Exemplo de imagens em a) 17 GHz e a) 34 GHz do NoRH	30
14	Imagem do Satélites NASA/SDO	31
15	Imagens em EUV observadas pelo SDO/AIA em a) 1600 Å, b) 304 Å e c) 171 Å em 06/06/2011	32
16	Imagens do Sol em rádio (17 GHz) do NoRH com os polos delimitados a $\pm 60^\circ$ de latitude, considerando-se a inclinação a) mínima (06/03/2009) e b) máxima (08/09/1996) de B_0	33
17	Histograma do mapa do Sol em 17 GHz do NoRH de 27/01/2002	34
18	Perfil de temperatura norte/sul da imagem em 17 GHz do NoRH de 27/01/2002 para cálculo do raio médio em 50% do brilho	35
19	Imagem do Sol em 17 GHz do NoRH de 27/01/2002 com 240 pontos em cada polo, utilizados para cálculo do raio médio em 50% do brilho	36
20	Exemplo de perfis longitudinais de imagem do NoRH em 17 GHz de 06/03/1996	37
21	Intensidade de brilho relativa das médias dos polos do Sol em 17 GHz com todos os pontos e com a média corrida de 180 dias	38
22	Intensidade de brilho relativa das médias polares e o Sol calmo em 17 GHz	39
23	Razão entre médias polares em 17 GHz em que 1,2 sc são excluídas	40
24	Histograma de 06/03/2011 em 171 Å do SDO/AIA	42
25	Imagem do Sol de 06/03/2011 em 171 Å e exemplo de perfis de intensidade de brilho	42

26	Histograma de 08/09/2010 em 304 Å	43
27	Imagem do Sol de 08/09/2010 em 304 Å e exemplo de perfis de intensidade de brilho	44
28	Histograma de 08/09/2010 em 1600 Å	44
29	Imagem do Sol de 08/09/2010 em em 1600 Å e exemplo de perfis de intensidade de brilho	45
30	Intensidade de brilho nas observações em 171 Å de mapas do SDO/AIA	46
31	Intensidade de brilho nas observações em 304 Å de mapas do SDO/AIA	46
32	Intensidade de emissão polar em 1600 Å dos mapas obtidos do SDO/AIA	47
33	Intensidade de emissão ajustada das observações em 1600 Å de mapas do SDO/AIA	48
34	Mapas de intensidades de brilho polar em a) 171 Å, b) 304 Å, c) 1600 Å e d) 17 GHz	49
35	a) imagem em 171 Å (SDO/AIA), de 06/06/2013, com cortes radiais e seu perfil do limbo em 100" abaixo do raio	51
36	Intensidades de 100" no limbo do Sol em 17 GHz em a) 15/05/1996 e em c) 24/11/2004 (NoRH)	52
37	Mapa sinóptico do limbo solar em 17 GHz do período entre 07/1992 e 06/2014	53
38	Média das intensidades de brilho no limbo solar em 17 GHz do mês de 03/2006	54
39	Filamentos em mapas do Nobeyama em 17 GHz do mês 03/2006	55
40	Intensidades de 100" no limbo do Sol em 171 Å em 15/03/2011 e em 09/03/2004 (SDO/AIA)	57
41	Intensidades de 100" no limbo do Sol em 304 Å em 15/03/2011 e em 09/03/2004 (SDO/AIA)	58
42	Intensidades de 100" no limbo do Sol em 1600 Å em 15/03/2011 e em 09/03/2004 (SDO/AIA)	59
43	Mapas sinóticos do limbo solar em EUV e 17 GHz a partir de 2010.	60
44	Média da intensidade de brilho em EUV e em 17 GHz, no mês 07/2010	62
45	Comparação da intensidade relativa entre 17 GHz e 171 Å, 304 Å, 1600 Å no equador	64
46	Comparação da intensidade relativa entre 17 GHz e 171 Å, 304 Å, 1600 Å nos polos	66

LISTA DE TABELAS

Pág.

1	Tabela de índices primários observados pelo AIA.	31
2	Tabela de índices de correlação entre os valores diários das médias angulares obtidos no limbo solar em 17 GHz e nas linhas de EUV	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIA	–	<i>Atmospheric Imaging Assembly</i>
BBSO	–	<i>Big Bear Solar Observatory</i>
CME	–	Ejeção de Massa Coronal
EIT	–	<i>Extreme ultraviolet Imaging Telescope</i>
EUV	–	Extremo ultravioleta
FITS	–	<i>Flexible Image Transport System</i>
HMI	–	<i>Helioseismic and Magnetic Imager</i>
IDL	–	<i>Interactive Data Language</i>
JAXA	–	<i>Japanese Aerospace Exploration Agency</i>
NoRH	–	<i>Nobeyama Radio Heliograph</i>
SDO	–	<i>Solar Dynamics Observatory</i>
SOHO	–	<i>Solar & Heliospheric Observatory</i>
Å	–	angstrom (10^{-10} m)
GHz	–	gigahertz (10^9 Hz)
K	–	kelvin
km	–	quilômetros (10^3 m)
arcsec	–	segundos de arco

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

B_0	–	inclinação do eixo de rotação do Sol em relação ao plano da eclíptica
I_f	–	intensidade relativa ao sol calmo
a	–	coeficiente linear da reta
b	–	coeficiente angular da reta
dif	–	diferença entre dois ajustes lineares distintos
n	–	densidade eletrônica
r_1	–	reta 1 de ajuste de mínimos quadrados
r_2	–	reta 2 de ajuste de mínimos quadrados
r_{ad}	–	raio adotado
r_{op}	–	raio ótico do Sol, obtido no cabeçalho do arquivo da imagem
rm	–	raio médio observado
rp	–	média de r_{op} para o período observado
R_{\odot}	–	raio solar óptico
rZ_{mp}	–	razão entre rm e rp
sc	–	sol calmo
T	–	temperatura efetiva
T_b	–	temperatura de brilho

Gregos

λ	–	comprimento de onda
ρ	–	coeficiente de correlação linear de Pearson
ρ_e	–	densidade de elétrons
σ	–	desvio padrão de um grupo de dados
τ	–	opacidade

Químicos

C	–	Carbono
Fe	–	Ferro
H	–	Hidrogênio
He	–	Hélio

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 O Sol e seu ciclo de atividade	14
1.1.1 O interior do Sol	14
1.1.2 A atmosfera solar	16
1.1.3 Atividade solar	19
1.1.3.1 Campos magnéticos e o ciclo solar	20
1.1.3.2 Atividade equatorial	22
1.1.3.3 Atividade polar - Buracos coronais e fáculas polares	24
1.2 Abrihantamento do limbo	26
2 OBJETIVOS DO TRABALHO	28
3 DADOS OBSERVACIONAIS	29
3.1 Seleção dos mapas em 17 GHz	29
3.2 Seleção das imagens em EUV	30
3.3 Softwares utilizados	32
4 ANÁLISE DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Brilho médio das regiões polares	33
4.1.1 Mapas em 17 GHz	34
4.1.1.1 Cálculo do raio solar em 17 GHz	34
4.1.1.2 Procedimento de cálculos das médias polares	36
4.1.1.3 Resultados obtidos em 17 GHz	38
4.1.2 Mapas em extremo ultravioleta	40
4.1.2.1 Cálculo do raio solar em ultravioleta	41
4.1.2.2 Resultados obtidos em ultravioleta	44
4.2 Mapas sinópticos de limbo	50
4.2.1 Procedimentos	50
4.2.2 Análise dos mapas em 17 GHz	50
4.2.3 Análise dos mapas em ultravioleta	54
4.2.4 Comparação entre o brilho médio obtido em 17 GHz e EUV	63
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O Sol sempre foi objeto de observações e estudos desde o início da humanidade. Sabe-se hoje que o Sol é uma estrela média e, por estar a Terra mais próxima dele do que de outras estrelas, ele parece maior e mais brilhante para nós. Ele é o responsável por manter na Terra as características ideais para a existência da vida no planeta em suas diversas formas. Fundamentalmente, o Sol é uma esfera de gás incandescente, e sua energia é gerada por meio de reações termo-nucleares que ocorrem no seu núcleo. Seu estudo serve de base para o conhecimento das outras estrelas que, devido à distância, aparecem na Terra como pequenos pontos de luz cintilantes (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Estudar a estrutura do Sol e suas atividades é importante também para entender, além de outras estrelas, os sistemas planetários, as galáxias e o próprio universo. Além disso, é possível estudar as implicações no clima espacial e a física de plasmas, em que são necessárias temperaturas extremamente quentes em campos magnéticos fortes (HATHAWAY, 2014).

Para melhor entendimento deste trabalho é necessário entender a dinâmica da atmosfera solar e das diversas estruturas que a compõem (manchas solares, regiões ativas, fáculas, buracos coronais etc.). Portanto, será feita uma revisão, ao longo deste capítulo, do interior do Sol, da estrutura da atmosfera solar e de alguns fenômenos que acontecem nela.

1.1 O Sol e seu ciclo de atividade

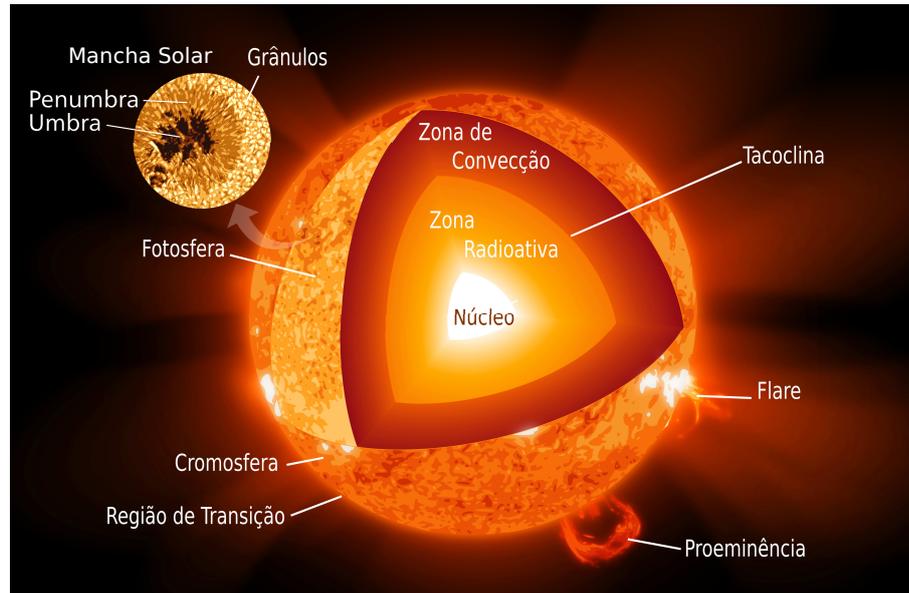
O Sol é uma estrela formada principalmente por H (Hidrogênio) e He (Hélio), com $\sim 92\%$ e $\sim 8\%$, respectivamente, e ainda com traços de O (Oxigênio), C (Carbono) e N (Nitrogênio) e outros metais mais pesados. Sua massa total é de aproximadamente $1,9 \times 10^{30}$ kg (mais de 99% da massa de todo o Sistema Solar) e tem cerca de 4,6 bilhões de anos. O seu raio óptico (R_{\odot}) é de $6,96 \times 10^5$ km (100 vezes o da Terra) e nosso planeta fica a uma distância média de $1,5 \times 10^8$ km (1 U.A.) do Sol. A energia é gerada em seu núcleo, a uma temperatura em torno de $1,5 \times 10^7$ K, a qual é suficiente para realizar reações termo-nucleares e manter seu material ionizado (plasma). Ele se mantém em equilíbrio hidrostático, no qual a pressão interna é contrabalanceada pela força gravitacional (MOLDWIN, 2008). Os estudos do Sol foram separados em duas partes: o interior e a atmosfera. A Figura 1 mostra essas partes e suas respectivas estruturas de acordo com características específicas.

1.1.1 O interior do Sol

Segundo Moldwin (2008), o interior do Sol é conhecido devido a modelos de estrutura estelar e de medidas de heliossismologia. A região do interior do Sol é subdividida em camadas: núcleo, zona radiativa, taoclina e zona de convecção.

O núcleo possui em torno de 50% da massa solar, 1,5% de seu volume e se estende

Figura 1 - Estrutura do Sol: interior e atmosfera.



Fonte: o Autor. (adaptado de Kelvinsong (2012))

aproximadamente até 25% do centro solar ($1,75 \times 10^5$ km). Nele, a temperatura média de $1,5 \times 10^7$ K e uma densidade de 150 g.cm^{-3} (~ 150 vezes a da água) permitem as reações termo-nucleares de fusão entre átomos de hidrogênio, transformando-os em He (HATHAWAY, 2014).

A energia gerada é transportada por fótons que saem do núcleo e são absorvidos e reemitidos milhares de vezes em seu caminho até a superfície solar, cada vez com uma energia um pouco menor. Esse trajeto, dominado pela radiação se estende do núcleo até $\sim 70\%$ do raio solar e é denominado zona radiativa. Nela, a temperatura decresce de 7×10^6 K para 2×10^6 K e a densidade de 20 g.cm^{-3} (ouro) para $0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ (1/5 a da água) à medida que o raio aumenta. Esse processo de transporte de energia pode levar milhões de anos. Com a perda de energia, os comprimentos de onda (λ) dos fótons aumentam gradualmente à medida que eles se movem em direção à superfície (HATHAWAY, 2014).

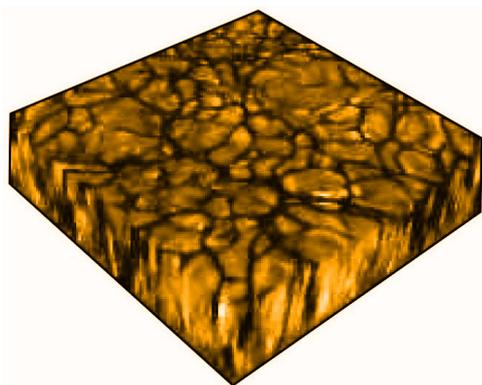
Ao atingirem cerca de $70\% R_{\odot}$, o plasma local deixa bruscamente de ter uma rotação uniforme e passa para uma rotação diferencial. Acredita-se que essa região de transição, denominada tacoclina, é responsável pela rotação diferencial da superfície solar (MIESCH, 2005). Estimativas recentes de heliossismologia de Charbonneau *et al.* (1999) indicam que a tacoclina está localizada entre $\sim 0,693 \pm 0,003 R_{\odot}$ e $\sim 0,713 \pm 0,003 R_{\odot}$ nas proximidades do equador solar. Entretanto, ela é significativamente alongada à medida que a latitude se eleva chegando a $\sim 0,717 \pm 0,003 R_{\odot}$ na latitude de 60° . Os resultados de Charbonneau *et al.* (1999) caracterizaram a espessura da tacoclina em $\sim 0,039 \pm 0,013 R_{\odot}$ nas proximidades do equador e em $\sim 0,042 \pm 0,013 R_{\odot}$ em latitudes de 60° . Por outro lado, Basu e Antia (2003) encontraram um aumento mais significativo da espessura da tacoclina de $\sim 0,016 R_{\odot}$ no equador para $\sim 0,038 R_{\odot}$ na latitude de 60° . Além disso, eles sugerem que pode haver uma transição brusca de uma tacoclina estreita a baixas latitudes para uma mais ampla em latitudes elevadas,

possivelmente associada com o sinal do gradiente de velocidade angular radial, que inverte a uma latitude de $\sim 35^\circ$.

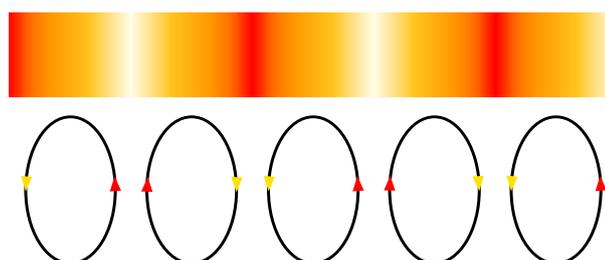
Com o decréscimo da temperatura para 2×10^6 K, considerada relativamente fria em relação à camada radiativa, torna-se possível a formação de íons de H, C, N, O e Fe. Isso torna o material mais opaco e impede o livre fluxo da radiação. Dessa forma, o calor é aprisionado ao plasma que o torna instável, no qual começa a ser transportado por convecção. Essa zona de convecção tem a densidade de $2 \times 10^{-7} \text{ g.cm}^{-3}$ (cerca de 1/10000 a densidade do ar ao nível do mar) e sua extensão de aproximadamente 2×10^5 km até à superfície solar, onde a luz se torna visível. O fluido expande-se e arrefece à medida que sobe em direção à superfície solar, onde a temperatura diminui aproximadamente para $5,8 \times 10^3$ K. Os próprios movimentos de convecção são visíveis na superfície como grânulos (± 1000 km de diâmetro) e supergrânulos (± 35000 km de diâmetro) (HATHAWAY, 2014).

A Figura 2a mostra uma representação de grânulos na superfície solar. As regiões escuras entre os grânulos são regiões onde o gás mais frio e mais denso está indo para baixo. A Figura 2b esquematiza a movimentação do gás quente das camadas interiores que sobe e deposita a energia térmica nas camadas superiores. Com a perda de calor e, conseqüentemente, o aumento de densidade, o gás desce para as camadas mais internas.

Figura 2 - Interior do Sol: zona de convecção. a) representação de grânulos na superfície solar e b) movimentação do gás quente das camadas interiores: O fluido mais quente sobe (setas vermelhas), esfria e retorna (setas amarelas) à base da zona de convecção.



(a) Fonte: adaptado de Malagoli (2013)



(b) Fonte: o Autor

1.1.2 A atmosfera solar

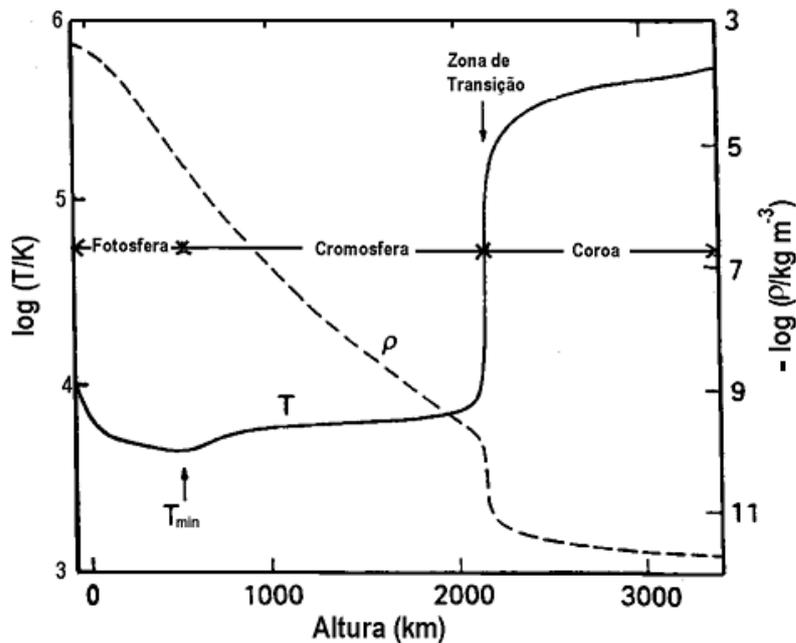
Já a sua atmosfera é estudada pelos elementos do plasma solar que emitem radiação em todas as frequências do espectro eletromagnético, conforme a temperatura de cada região. Dessa forma, com instrumentos específicos é possível estudar as características de diferentes alturas da atmosfera solar.

No topo da zona de convecção, encontra-se uma região irregular, chamada de superfície pelo fato de bloquear a visão das demais camadas interiores e de dar a impressão de ser o

local onde toda a luz solar visível parece ser emitida. A partir dessa superfície, inicia-se a atmosfera, que é a região mais externa do Sol, e podemos dividi-la, para efeitos de estudo, em quatro partes: a parte mais inferior é a fotosfera, de onde vem a maior parte da luz visível; acima dela está a cromosfera, vista a olho nu somente durante eclipses totais do Sol; no topo da cromosfera ocorrem bruscas mudanças de temperatura e da densidade do plasma, é uma fina camada chamada de região de transição; a coroa é a camada mais externa, ela tem a temperatura da ordem de $\sim 10^6$ K e se estende para o espaço, é muito tênue e só pode ser vista a olho nu durante eclipses solares totais (KUTNER, 2003).

A Figura 1.1.2 mostra de uma forma didática a distribuição de densidade e temperatura na atmosfera solar. Nela, observa-se que a densidade do plasma fica cada vez mais rarefeita com o aumento da altitude. Entretanto, a temperatura cai na região da fotosfera até atingir seu valor mínimo e, na cromosfera, possui um pequeno gradiente positivo de temperatura até a região de transição, onde a temperatura sobe abruptamente.

Figura 3 - Distribuição de temperatura (linha contínua) e densidade (linha tracejada) na atmosfera do Sol.



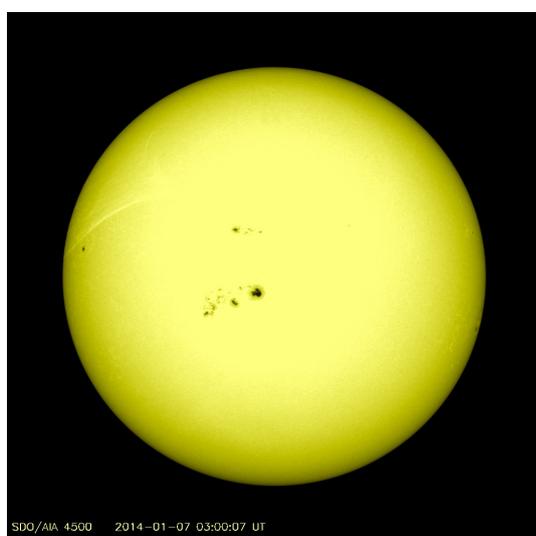
Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2014).

- **Fotosfera:** é a camada mais inferior da atmosfera solar e, essencialmente é a “superfície” solar de onde vemos a maior parte da luz. A espessura da fotosfera estende-se de ~ 100 km (STIX, 2004) até ~ 300 km (ZIRIN, 1998). A temperatura na base é de ~ 5780 K e cai para ~ 4200 K, a menor do Sol, onde é delimitada a sua espessura. A densidade é muito baixa, chegando a um milionésimo da densidade da água. Com um telescópio simples (com filtro para reduzir a intensidade da luz do sol) várias características como manchas escuras, fáculas brilhantes,

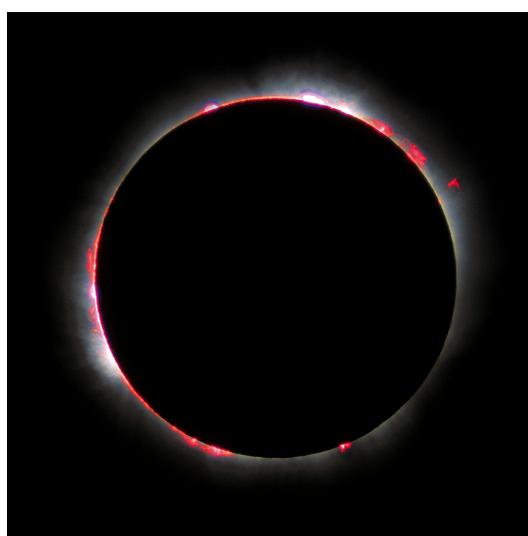
e grânulos podem ser observadas na fotosfera solar. A Figura 1.5(a) mostra uma imagem em ultravioleta registrada em 4500 \AA , obtida em 06 de junho de 2011 pelo instrumento SDO/AIA. Nela, podemos observar algumas manchas.

- **Cromosfera:** (do grego = esfera de cor) a cromosfera possui entre 2000-3000 km de espessura. Sua temperatura vai de $\sim 4200 \text{ K}$ para cerca de 20.000 K , que permite a emissão em $H\alpha$ (série de Balmer) de luz com um tom avermelhado. Entre outros comprimentos de onda, ela emite também na linha do cálcio ionizado (Ca II), parte ultravioleta do espectro solar, a um comprimento de onda de $393,4 \text{ nm}$ (HATHAWAY, 2014). A maioria dos comprimentos de onda emitidos pela cromosfera na região do óptico são extremamente finos em relação à radiação contínua emitida pela fotosfera que, em condições normais, fazem com que ela se torne transparente às observações a olho nu. No entanto, ela se torna visível, na cor avermelhada, durante um eclipse total do Sol, quando a fotosfera está totalmente oculta (KUTNER, 2003). A Figura 1.5(b) mostra a cromosfera solar, em tons avermelhados, obtida no eclipse solar de 11/08/1999.

Figura 4 - a) Imagem da fotosfera solar registrada em 4500 \AA pelo SDO/AIA em 07/01/2014. e b) Imagem da cromosfera solar vista no eclipse solar de 11/08/1999.



(a) Fonte: SDO/AIA (2014)

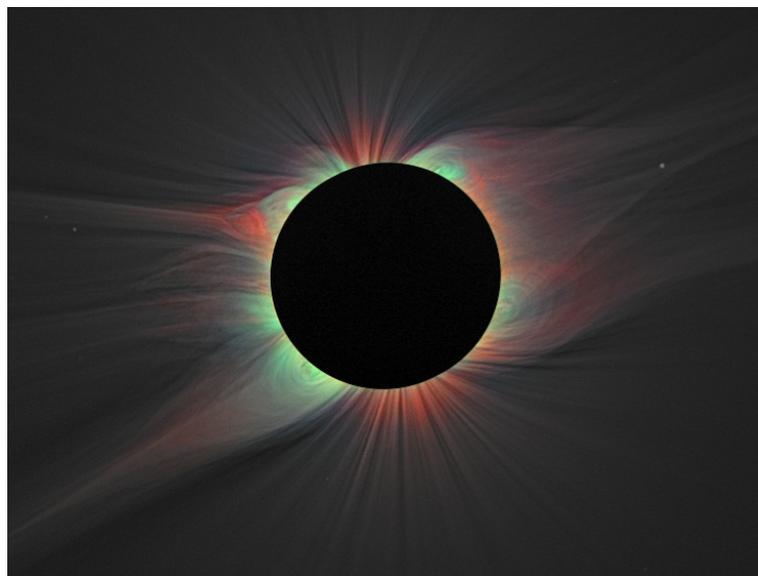


(b) Fonte: Luc Viatour (1999)

- **Região de Transição:** com cerca de apenas 100 km de espessura, sua temperatura salta de $2 \times 10^4 \text{ K}$ para até $2 \times 10^6 \text{ K}$. A densidade, por sua vez, decresce para valores em torno de 10^8 cm^{-3} , valores estes típicos da coroa solar em períodos de baixa atividade solar. A luz na região de transição é predominantemente emitida por íons de C IV , O IV , e o Si IV (faixa do ultravioleta), que pode ser detectada apenas fora da atmosfera terrestre por instrumentos colocados em satélites (HATHAWAY, 2014).

• **Coroa:** região extremamente rarefeita (10^{-9} vezes a densidade da Terra) e com temperatura de cerca de 2×10^6 K (KUTNER, 2003). Ela é visível a olho nu, em uma cor clara e perolada, somente em eclipses. Sua extensão atinge todo o meio interplanetário através do vento solar, apesar de ser mais concentrada até cerca de dois raios solares. O Hidrogênio, o Hélio e até elementos como o Carbono, Nitrogênio e Oxigênio são completamente ionizados nessas temperaturas. Porém, os elementos mais pesados, como o Ferro e o Cálcio, são capazes de reter alguns dos seus elétrons (HATHAWAY, 2014). Sua alta temperatura leva a supor a existência de uma fonte de energia adicional. Vários modelos já foram propostos para isso, mas nenhum ainda foi conclusivo. A observação da coroa é feita em raio-X, em extremo ultravioleta (EUV), em rádio e em luz branca (com coronógrafos que produzem eclipses artificiais) (SILVA, 2006). A Figura 5 mostra uma sobreposição de imagens da coroa solar das linhas de emissão de ferro altamente ionizado e luz branca tiradas durante um eclipse de 2008. Vermelho indica a linha de ferro Fe XI 789,2 nm, azul representa a linha de ferro Fe XIII 1074,7 nm e verde mostra linha de ferro Fe XIV 530,3 nm. Este é o primeiro mapa da distribuição de 2-D de temperatura eletrônica coronal e estado de carga do íon (HABBAL *et al.*, 2009).

Figura 5 - Sobreposição de imagens da coroa solar das linhas de Fe XI 789,2 nm (vermelho), Fe XIII 1074,7 nm (azul) e Fe XIV 530,3 nm (verde).



Fonte: Habbal *et al.* (2009)

1.1.3 Atividade solar

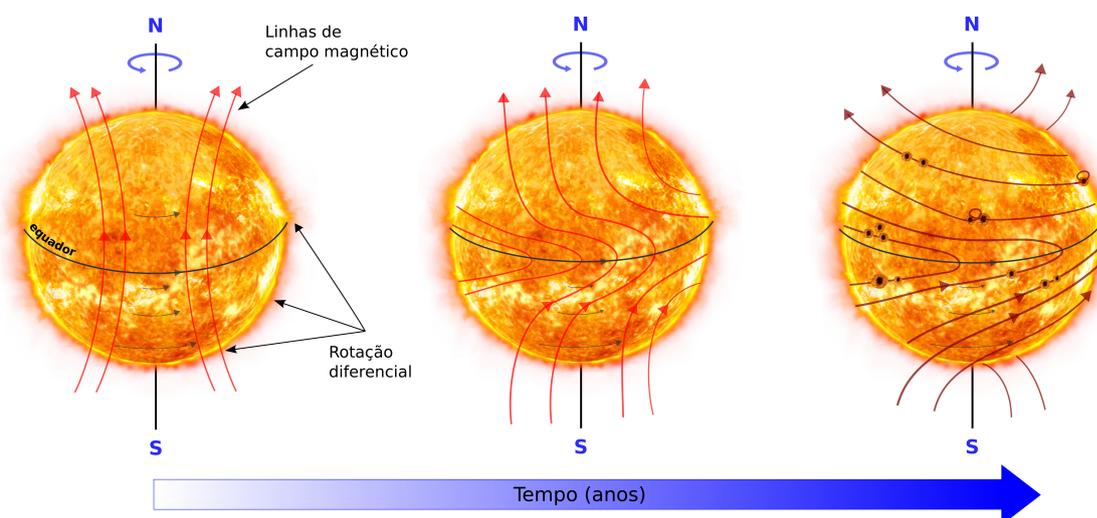
Nesta seção será feita uma revisão da estrutura magnética do Sol e suas principais características observacionais. Algumas dessas estruturas são encontradas na região equatorial

do Sol e outras são encontradas nos polos. Aqui serão descritas as estruturas solares que, de alguma forma, estão envolvidas neste trabalho.

1.1.3.1 Campos magnéticos e o ciclo solar

Uma das características de objetos gasosos é a rotação diferencial causada pelas diferentes velocidades angulares, que variam de acordo com a latitude e o raio. A redistribuição do momento angular causa um gradiente de rotação angular, que gera campos magnéticos de grande escala, através de um dínamo hidromagnético. A região onde os gradientes são mais fortes é a interface entre a camada radiativa e a turbulenta zona de convecção do Sol, a *tacoclina*, portanto onde se espera que os processos de dínamo sejam mais eficientes (MIESCH, 2012). Segundo Lang (1997), a rotação diferencial foi citada pela primeira vez por R. Carrington (1826–1875), em 1858, e logo em seguida, independentemente, pelo hélio-físico alemão Gustav Spörer (1822–1895). Hoje, depois de diversos estudos, sabe-se que as regiões próximas ao equador completam uma volta em aproximadamente 27 dias, enquanto que as regiões polares a completam em cerca de 36 dias (MIESCH, 2005). A Figura 6 mostra a evolução temporal das linhas de campos magnéticos durante um ciclo solar. Nela, observa-se que as linhas vão sendo esticadas e torcidas por causa da rotação menor nas proximidades do equador.

Figura 6 - Evolução do campo magnético do Sol durante um ciclo solar.



Fonte: o Autor (adaptado de Solar System Scope (2014))

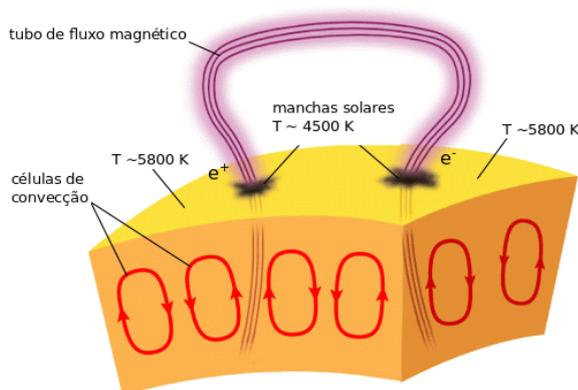
Por meio de observações verificou-se que a quantidade de manchas na superfície variava periodicamente em um ciclo de aproximadamente 11 anos (SCHWABE, 1843) e é denominado de ciclo solar. Em períodos de alta atividade, o número de manchas observado é bem maior que em períodos de baixa atividade, em que poucas manchas são observadas. Hale (1908)

constatou que o campo magnético solar global inverte a polaridade após cada ciclo de manchas solares. Portanto, um ciclo magnético completo leva ~ 22 anos.

Por causa da rotação diferencial, as linhas de campo magnético de baixa latitude “esticadas” acabam se enrolando em torno da tacoclina. Com o tempo, alguns desses campos magnéticos movem-se para o equador e se anulam com campos magnéticos de polaridade oposta vindas do outro hemisfério e outros movem-se para altas latitudes e se conectam com os campos magnéticos existentes nos polos do Sol. Esses procedimentos permitem uma reconfiguração global do campo magnético solar, porém com polaridade magnética inversa à anterior (SILVA, 2006).

No interior solar, os campos magnéticos intensos são localizados em uma região tubular chamada de tubo de fluxo magnético. Para manter o equilíbrio entre um tubo de fluxo magnético e o meio adjacente a ele, a pressão do gás do meio deve ser igual à pressão do gás interno ao tubo mais a pressão magnética existente dentro dele ($P_{gas_meio} = P_{gas_tubo} + P_{mag_tubo}$). Portanto, a pressão e a densidade do gás dentro do tubo devem ser menores, uma vez que a pressão do gás é proporcional ao produto de sua densidade pela temperatura, e a temperatura é a mesma dentro e fora do tubo. Por serem menos densos, os tubos tendem à superfície solar e nessa trajetória os campos magnéticos são amplificados pela rotação diferencial e pela força de Coriolis (causada pela rotação do Sol). Alguns desses tubos atravessam a superfície solar (Figura 7) formando as manchas solares. Isso explica também porque as manchas sempre aparecem em pares e polaridade magnética diferente (SILVA, 2006).

Figura 7 - Tubo de fluxo magnético atravessando a superfície solar e formando par de mancha solar.



Fonte: o Autor (adaptado de Addison Wesley (2007))

Diversos trabalhos feitos nos últimos anos apontaram que os campos magnéticos do Sol vêm sinalizando uma diminuição em suas intensidades. Wang *et al.* (2009) estudaram os campos magnéticos polares através de magnetogramas do Observatório Monte Wilson (FMO) e do Observatório Solar Wilcox (WSO) e concluíram que esses estavam 40% mais fracos durante os últimos 3 ciclos.

Janardhan *et al.* (2010) examinaram os campos magnéticos polares durante os últimos três ciclos solares (21, 22 e 23) usando magnetogramas do NSO/Kitt Peak e magnetogramas SOHO/MDI em latitudes acima de 78° . Ambos os hemisférios solares mostram uma queda significativa no valor absoluto dos campos magnéticos polares no mínimo entre os ciclos 22 e 23. Ainda sugeriram que as inversões de polaridades dos campos magnéticos polares não foram simultâneas nos dois hemisférios nos ciclos analisados.

1.1.3.2 Atividade equatorial

As manchas solares são o fenômeno mais notável na fotosfera. São grupos de regiões irregulares mais escuras do que o restante da fotosfera, observadas na faixa do visível. Os primeiros registros foram feitos na China já no ano 28 a.C., mas seu estudo científico começou com Galileu (com o uso do telescópio) e com Thomas Harriot (1560-1621) em 1610, por Johannes (1587-1616), David Fabricius (1564-1617) e por Christoph Scheiner (1575-1650) em 1611.

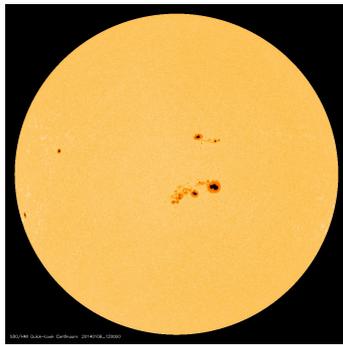
As manchas solares são constituídas de duas partes: a umbra, parte central, e a penumbra, região com estrutura radial em torno da umbra. Elas possuem cerca de 3800 K e são mais escuras porque são mais frias que o restante da fotosfera (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). O diâmetro médio da umbra é de 10.000 km, mas pode exceder 20.000 km. Em 1908, Hale propôs que as manchas são mais frias devido à presença de campos magnéticos fortes que impedem a convecção do plasma e conseqüentemente impedem também que o calor das partes mais internas suba à fotosfera (HANSLMEIER, 2007).

As manchas solares são locais de muita atividade e, geralmente coincidem com uma série de outros eventos solares, como *flares* e ejeções de massa coronal (CMEs), que muitas vezes interferem nas comunicações eletrônicas aqui na Terra e possivelmente até mesmo no clima. Apesar de serem escuras no óptico, as manchas aparecem mais brilhantes que o resto do disco solar quando são observadas em ultravioleta, raio-X e rádio, e são denominadas regiões ativas (SILVA, 2006).

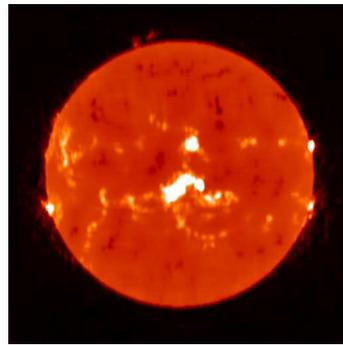
As imagens da Figura 8 mostram a região ativa NOAA 11944 obtida pelo SDO em luz branca pelo instrumento HMI (*Helioseismic and Magnetic Imager*), em 17 GHz obtida pelo NoRH e em 304 \AA obtida pelo instrumento AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*). Essa é uma das maiores manchas solares dos últimos nove anos e foi vista no início de janeiro/2014 (PESNELL, 2014).

No início do ciclo solar, as manchas aparecem em latitudes medianas (20° a 40°) e com o aumento da atividade elas começam a surgir cada vez mais próximas ao equador; esse fenômeno foi postulado por Carrington em seus estudos (CLIVER; KEER, 2012). No início do século XX, Edward Walter Maunder (1851 — 1928) construiu um gráfico chamado diagrama da borboleta (Figura 9) para visualizar melhor essa evolução das manchas durante o ciclo solar (STIX, 2002). Esse diagrama consiste em uma divisão latitudinal da superfície solar e sua evolução temporal. Nele, são colocadas as médias de manchas solares no tempo de acordo com

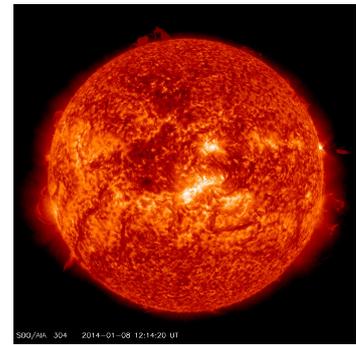
Figura 8 - Região ativa NOAA 11944 em a) luz branca, b) 17 GHz e c) 304 Å.



(a) Fonte: SDO/HMI (2014)



(b) Fonte: NoRH (2014)

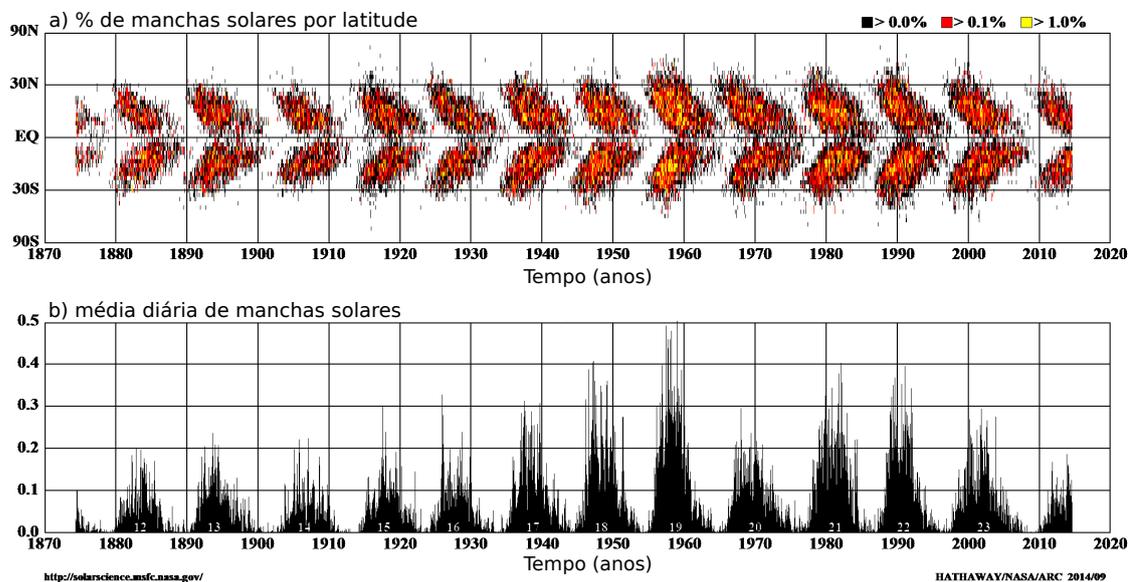


(c) Fonte: SDO/AIA (2014)

a latitude que, no final, assemelham-se a asas de borboletas (Figura 9a). A Figura 9b mostra a variação da média mensal do número de manchas solares durante os ciclos de atividade. O gráfico mostra uma queda substancial no número de manchas a partir do ciclo 22, após oito ciclos de aumento contínuo, entre 1880 e 1960.

Figura 9 - a) Diagrama da borboleta e b) média diária das manchas solares durante os ciclos de atividades.

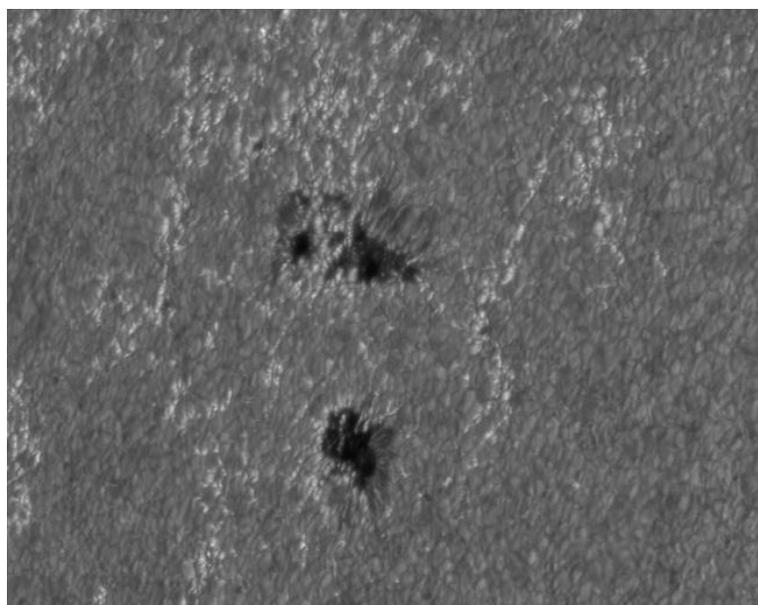
Média diária das áreas de manchas solares sobre cada rotação



Fonte: adaptado de Hathaway (2014).

As regiões de maior atividade magnética na fotosfera solar resultam na formação de áreas de gás mais quentes. Essas regiões, denominadas fáculas (Figura 10), tendem a persistir ainda durante e após o desaparecimento das manchas, tendo o tempo de vida média de aproximadamente 90 dias (SEAL; SEAL, 2003). Elas são visíveis em luz branca mais facilmente no limbo e com filtros monocromáticos são vistas acima do disco solar, como nas linhas de emissão do Cálcio e H α . As fáculas possuem uma largura de 5000 a 10000 km, um comprimento de até 50000 km, e cada elemento possui um formato aproximadamente oval (EVREN, 1999). Além das fáculas equatoriais, estruturas similares são observadas nos polos, que serão apresentadas na próxima seção.

Figura 10 - Fáculas solares.



Fonte: Hathaway (2014)

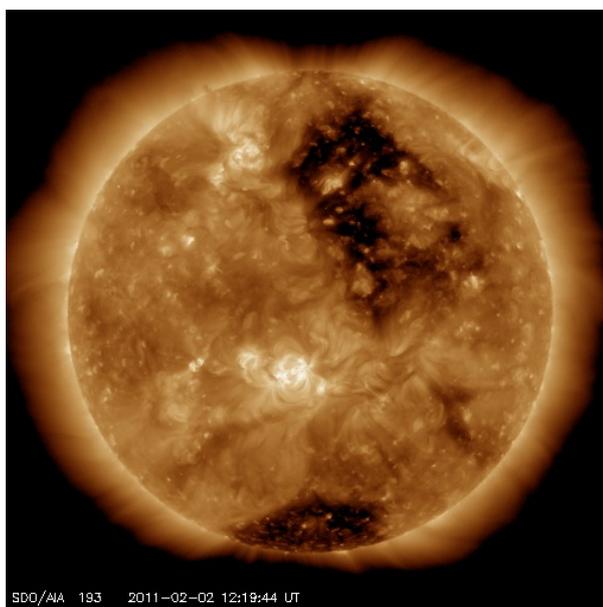
1.1.3.3 Atividade polar - Buracos coronais e fáculas polares

Buracos coronais são observados como regiões mais escuras na coroa solar, devido a baixa densidade de plasma. Eles são formados devido à presença de campos magnéticos localmente abertos, os quais não conseguem reter o plasma. Devido à pressão de radiação proveniente do Sol, são locais propícios para a formação do vento solar de alta velocidade (~ 800 km/s) (CRANMER, 2009). Eles podem persistir por 3 a 5 rotações solares parecendo girar rigidamente com um período de cerca de 27,5 dias, independentemente de sua latitude (CRANMER, 2001).

Durante o período de mínimo da atividade solar, quando o campo magnético do Sol se comporta como um dipolo, são vistos grandes buracos coronais nas calotas polares praticamente o tempo todo, enquanto que, em períodos de maior atividade, podem ser vistos em todas as latitudes da esfera solar. Os buracos coronais associados a seus fluxos de vento de alta velocidade são responsáveis por uma parte de grandes tempestades geomagnéticas na Terra (1 AU)

(CRANMER, 2009). Eles são observados diretamente em comprimentos de onda de ultravioleta (Figura 11) e de raio-X, enquanto que no óptico podem ser observados com o obscurecimento da luz do disco solar (coronógrafo).

Figura 11 - Buracos coronais observados em EUV (193 Å) pelo SDO/AIA em 02/02/2011.



Fonte: SDO/AIA (2014)

Também associadas ao campo magnético polar do Sol, porém na baixa atmosfera, em latitudes superiores a 50° , ocorrem as fáculas polares com até ~ 2500 km de diâmetro e poucas horas de duração. Além do formato oval, elas podem ser vistas também apenas como pontos. Elas ocorrerem com maior frequência durante o mínimo da atividade solar (JANSSENS; DU-BOIS, 2014; SEAL; SEAL, 2003).

Sheeley Jr. (1964) estudou o comportamento das fáculas polares e apontou que as mesmas têm uma variação cíclica de 11 anos como previsto por Babcock em 1961 e por Leighton em 1964. Esta variação, porém, estava anticorrelacionada com o ciclo solar, desaparecendo no máximo de manchas solares e aparecendo em grande número no período de mínimo de atividade.

A quantidade de fáculas polares está relacionada à intensidade dos campos magnéticos polares e podem ser usadas para estimar sua variação em relação ao ciclo solar (SHEELEY JR., 1976) Em 1990, Sheeley Jr. (1991) comparou as intensidades dos campos magnéticos polares obtidas pelo Observatório Solar Wilcox (WSO) entre 1970 e 1990 com o número de fáculas polares e apontaram que estas tinham valores 50% maiores durante o mínimo de manchas solares, em 1986, do que durante o mínimo de manchas solares anterior, em 1976.

Para completar o ciclo de um século de estudos sobre fáculas polares, Sheeley Jr. (2008), utilizando imagens em luz branca obtidas do Observatório do Monte Wilson (1985-

2006) e combinando com dados de seus trabalhos anteriores, estudou o comportamento de fáculas polares e ratificou que elas seguem um ciclo de 11 anos anticorrelacionadas com o número de manchas e que houve uma diminuição significativa desde 1986 (mínimo entre os ciclos 21/22) e, ainda, são bem correlacionados com a linhas de campo magnético polar medido no Observatório Wilcox Solar Observatory (WSO).

1.2 Abrilhantamento do limbo

Desde o final da década de 60, diversas observações em frequência de rádio foram feitas para verificar a existência do gradiente positivo de temperatura da cromosfera por meio de um aumento da temperatura de brilho próximo ao limbo solar. Mas somente a partir da década de 70, com antenas de melhor resolução angular e uso de técnicas mais avançadas, é que autores obtiveram algum sucesso (SELHORST, 2003).

Efanov *et al.* (1980) não encontraram abrilhantamento nos polos no período de máximo do ciclo solar 20 (1968-1972), mas sim logo após esse período, analisando mapas em 22 e 37 GHz. Com isso, propuseram um anticorrelacionamento entre a atividade solar e o abrilhantamento do limbo próximo aos polos.

Shibasaki (1998) analisou mapas obtidos pelo NoRH em 17 GHz, entre 1992 e 1997, para estudar o abrilhantamento polar. Ele concluiu que a partir de 50° de latitude (norte e sul), existe um aumento gradual do brilho que pode atingir até 40% acima do Sol calmo, sendo ~ 10% proveniente do gradiente de temperatura positivo da cromosfera, e o restante é da emissão de estruturas intrínsecas aos polos, enquanto que nas regiões equatoriais esse aumento é de somente 15%.

Nindos *et al.* (1999) também estudaram imagens em micro-ondas do Sol calmo em 17 GHz com imagens do NoRH. Eles mostram que o brilho polar consiste em dois componentes: um componente difuso de excesso de brilho de $1,5 \times 10^3$ K e pontos de fontes compactas com excesso de brilho de cerca de $3,5 \times 10^3$ K. Comparando a emissão de micro-ondas polar com imagens do SOHO/EIT nas linhas de He II (304 Å) e Fe XII (195 Å), eles não encontraram correlação um-para-um entre as fontes compactas em rádio e as emissões em EUV; observaram que os limites do abrilhantamento polar não correspondem exatamente aos limites dos buracos coronais tanto em imagens em 195 Å ou em 304 Å e que as variações temporais das fontes compactas em micro-ondas não correspondem a qualquer alteração significativa na emissão EUV. Eles sugeriram que a origem do abrilhantamento polar não é coronal, parecendo que a maior parte das emissões de rádio vem de camadas inferiores.

Riehkainen *et al.* (2001), utilizando um radiotelescópio em 37 GHz com resolução de 2,4 minutos de arco, estudaram a distribuição das regiões com temperaturas de brilho maiores. Segundo os autores, a frequência dessas regiões localizadas em altas latitudes estão correlacionadas com o ciclo das fáculas polares; entretanto, as regiões que aparecem em latitudes mais baixas parecem ter uma frequência que segue o ciclo de manchas. Essas observações sugerem

que o aumento de temperatura de brilho em rádio pode estar relacionado com a presença de grupos de fáculas polares.

Selhorst *et al.* (2003) mostraram que o abrilhantamento de limbo polar em 17 GHz está correlacionado com o ciclo das fáculas polares e, por consequência, anticorrelacionado com o ciclo de manchas solares. Além disso, recentemente, foi mostrado que este abrilhantamento de limbo reduziu sua intensidade média seguindo a redução magnética polar observada (SELHORST *et al.*, 2011; GOPALSWAMY *et al.*, 2012; NITTA *et al.*, 2014).

Maksimov *et al.* (2006) estudaram estruturas de um buraco coronal e seu entorno em 5,7 GHz a partir de imagens obtidas do *Siberian Solar Telescope Radio* e compararam com mapas em 17 GHz a partir de mapas obtidos pelo NoRH, entre 19 e 27/04/1998. O buraco coronal em estudo se diferenciava claramente do Sol calmo com um decréscimo na emissão em 5,7 GHz. Eles apontaram o buraco coronal estudado como pequenas estruturas não uniformes e com a temperaturas de brilho em 17 GHz anticorrelacionada com 5,7 GHz. Em outras palavras, quanto mais escuro é um buraco coronal em comprimentos de onda de emissão de rádio gerada na coroa, ele será mais brilhante na emissão em comprimentos de onda de rádio geradas na cromosfera. Resultados similares foram reportados por Gopalswamy *et al.* (1999) e Krissinel *et al.* (2000), estes últimos autores propõem um modelo atmosférico para a região com buracos coronais no qual ocorre um aumento mais suave da temperatura entre a cromosfera e a coroa, com a região de transição se estendendo por ~ 5000 km.

Analisando a relação da emissão em 17 GHz e em EUV, Selhorst *et al.* (2010) mostraram que a variação do abrilhantamento de limbo polar em 304 Å segue a mesma tendência que a emissão observada em 17 GHz. Por outro lado, as medidas em 171 Å mostraram anticorrelacionamento com os resultados obtidos em 304 Å e em 17 GHz, e isso se explica pelo fato de a linha do 171 Å ser formada na coroa onde a presença de buracos coronais possui grande influência na emissão observada. Porém, em trabalho recente, Nitta *et al.* (2014) não encontraram correlação individual entre as fontes compactas polares comumente observadas em 17 GHz e as imagens no EUV obtidas pelo AIA/SDO. Estes autores sugerem que a maioria dessas fontes compactas são artefatos gerados pelo algoritmo que gera os mapas interferométricos obtidos em 17 GHz pelo NoRH.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O recente mínimo de atividade (23/24), pelo qual o Sol passou nos últimos anos, foi bastante atípico e trouxe várias novas questões a serem respondidas. Dentre elas está o comportamento dos polos do Sol, o qual tem sido alvo de diversos trabalhos que buscam explicar as mudanças magnéticas ali observadas.

O objetivo deste trabalho é estudar a variação do brilho nos polos do Sol em rádio (17 GHz), utilizando mapas do *Nobeyama Radioheliograph* (NoRH), entre 1992 e 2014, e em extremo ultravioleta (EUV - 171 Å, 304 Å e 1600 Å), utilizando imagens do *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) a bordo do *Solar Dynamics Observatory* (SDO), no período de 2010 a 2014, a fim de avaliar a influência das estruturas cromosféricas e coronais na emissão observada em rádio.

3 DADOS OBSERVACIONAIS

Neste capítulo, serão descritos os dados utilizados neste trabalho e suas fontes de obtenção. Além disso, serão descritos os sistemas computacionais utilizados para realização dos procedimentos e cálculos.

3.1 Seleção dos mapas em 17 GHz

O NoRH é um rádio-telescópio dedicado a observar o Sol, desde julho de 1992, em 17 GHz (NAKAJIMA *et al.*, 1994) e em 34 GHz a partir de 1996 (TAKANO *et al.*, 1997). Ele possui 84 antenas com 80 cm de diâmetro cada uma, distribuídas em forma de um ‘T’, tendo 490 m de comprimento na direção leste-oeste e 220 m de comprimento na direção norte-sul (Figura 12).

Figura 12 - Imagem do NoRH. 84 antenas de 80 cm de diâmetro distribuídas em forma de ‘T’.

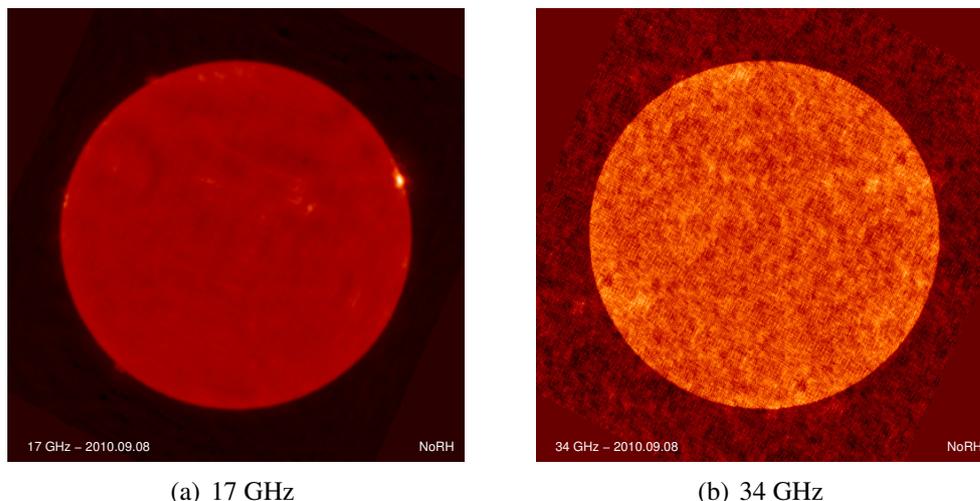


Fonte: NoRH (2014)

Os mapas das observações em rádio, na frequência de 17 GHz (Figura 3.14(a)) e em 34 GHz (Figura 3.14(b)), são disponibilizados no tamanho de 512×512 e 1024×1024 pixels, respectivamente. Sua resolução espacial é de $15''$ (17 GHz) e $7,5''$ (34 GHz). Por ser um instrumento em operação há praticamente dois ciclos de atividade solar ele possibilita o estudo de fenômenos ao longo dos ciclos, como as variações do anel de abrlhantamento e do raio solar (SELHORST *et al.*, 2003; SELHORST *et al.*, 2004). Os mapas estão disponibilizados no *site* (<http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/images/daily/>), encontrando-se separados por ano e mês e os arquivos estão no formato do padrão FITS. Os arquivos iniciados pelo prefixo “ifa” são os mapas em 17 GHz, e os de prefixo “ifz” em 34 GHz.

Neste trabalho, os mapas em 34 GHz não são analisados, pois o número de antenas usa-

Figura 13 - Imagens em rádio do NoRH de 08/09/2010 em a) 17 GHz e b) 34 GHz.



(a) 17 GHz

(b) 34 GHz

Fonte: NoRH (2014)

dos para a interferometria é menor do que o necessário nessa frequência e, por isso, apresentam ruídos muito acima do brilho médio esperado. O uso dessa frequência foi introduzido para o estudo de *flares* solares (TAKANO *et al.*, 1997).

Para o período entre 1992 e 2014, com 8035 dias corridos desde o início das observações do NoRH até o dia 30 de junho de 2014, foram eliminados os mapas que continham algum tipo de erro e alguns dias não disponibilizados pelo NoRH. Dessa forma, foram selecionados 7841 mapas para análise. A emissão contínua observada em 17 GHz forma-se principalmente na cromosfera solar, onde para $\tau \sim 1$, $T = 9600$ K e $\rho_e = 9,3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ (SELHORST *et al.*, 2005).

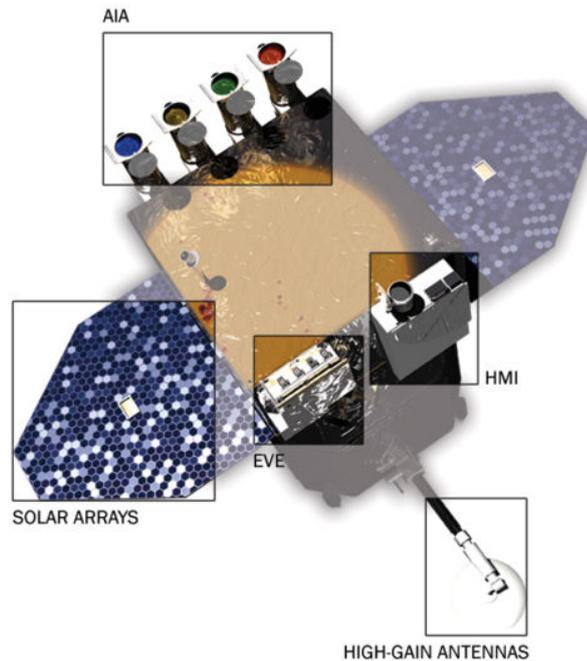
3.2 Seleção das imagens em EUV

Para a análise em EUV, foram obtidas imagens do AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*), instrumento a bordo do satélite SDO (*Solar Dynamics Observatory*). Este satélite (Figura 14) foi lançado em 2010, época do mínimo entre os ciclos 23 e 24, quando a intensidade do campo magnético polar atingiu níveis abaixo dos observados em mínimos solares anteriores, fazendo com que toda a atividade polar fosse reduzida.

O SDO/AIA disponibiliza imagens em vários comprimentos de onda observados na atmosfera solar. Esses comprimentos de onda estão sintetizados na Tabela 1, que foi adaptada de Lemen *et al.* (2012).

Neste trabalho, foram utilizadas imagens nas mesmas frequências estudadas por Selhorst *et al.* (2010), ou seja, 171 Å, 304 Å os quais são formados respectivamente na coroa solar e região de transição e, 1600 Å para observar o comportamento em relação ao ciclo solar de emissões acima da cromosfera. Essas linhas de emissão possuem as seguintes características:

Figura 14 - *Solar Dynamics Observatory* (SDO) - lançado em 2010 com 3000 kg, o seu comprimento total ao longo do eixo que aponta para o Sol é de 4,5 m, e 2,22 m de cada lado.



Fonte: SDO/AIA (2014)

Tabela 1 - Tabela de índices primários observados pelo AIA.

Comprimentos de onda	Região da atmosfera	Íon primário
1600 Å	região de transição e alta fotosfera	C VI e contínuo
304 Å	cromosfera e região de transição	He II
171 Å	alta região de transição e coroa	Fe IX
193 Å	coroa e plasma quentes de <i>flares</i>	Fe XII,XXIV
211 Å	regiões ativas da coroa	Fe XIV
335 Å	regiões ativas da coroa	Fe XVI
94 Å	<i>flaring</i> da coroa	Fe XVIII
131 Å	região de transição e <i>flaring</i> da coroa	Fe VIII,XXI

Fonte: adaptado de Lemen *et al.* (2012)

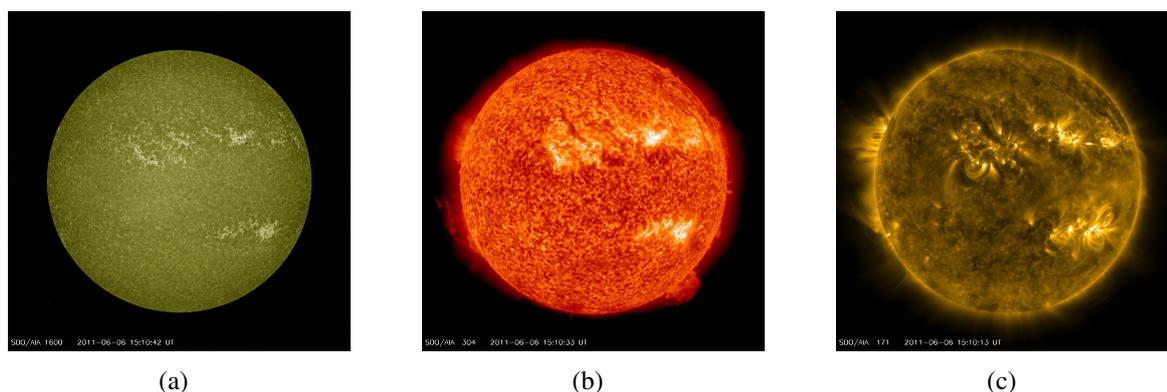
• **171 Å**: esse comprimento de onda é emitido por íons Fe IX,X, formados por temperaturas de 10^6 K, as quais se localizam na base da coroa solar. Ele mostra laços coronais – arcos que se estendem para fora do Sol, onde há fluxo de plasma ao longo das linhas do campo magnético. As manchas brilhantes vistas nas imagens em 171 Å são locais onde o campo magnético próximo da superfície é excepcionalmente forte.

- **304 Å**: essa linha de emissão é formada na cromosfera e região de transição por íons de He II a uma temperatura entre $5,0 \times 10^4$ K até $8,0 \times 10^4$ K. Essas estruturas aparecem como linhas escuras quando vistas em outras linhas de emissão. Mostram ainda áreas claras de plasma de alta densidade (PESNELL, 2014).

- **1600 Å**: este comprimento de onda emite na faixa do contínuo em alturas da região de transição a uma temperatura de 10^5 K e na linha de íons do C IV na região da cromosfera a uma temperatura média de 6×10^3 K. A faixa de 1600 Å mostra áreas claras que realçam os lugares onde feixes de linhas de campos magnéticos estão concentrados. No entanto, pequenas áreas com uma grande quantidade de linhas de campo aparecem escuras, geralmente perto de manchas solares e regiões ativas (PESNELL, 2014).

Do período observado pelo SDO, foram utilizadas em torno de 1500 imagens para análise. Essas imagens estão compreendidas entre 05/2010 e 06/2014. A Figura 15 mostra um exemplo das imagens ultravioleta do SDO/AIA em 1600 Å, 304 Å e 171 Å do dia 06/06/2011.

Figura 15 - Imagens em EUV observadas pelo SDO/AIA em a) 1600 Å, b) 304 Å e c) 171 Å em 06/06/2011.



Fonte: SDO/AIA (2014)

3.3 Softwares utilizados

O trabalho foi desenvolvido dentro do ambiente do sistema operacional LINUX - OpenSuse, utilizando a linguagem de programação *Interactive Data Language* (IDL). Além disso, foram utilizados alguns procedimentos e funções do pacote SolarSoftWare (SSW), obtido no site <http://www.lmsal.com/solarsoft/>, que consiste em um conjunto de bibliotecas integradas de softwares, bases de dados e utilitários de sistema que proporcionam uma programação comum e ambiente de análise de dados para a Física Solar. Assim foram desenvolvidas as funções e procedimentos necessários para ler os mapas e as imagens, realizar os cálculos necessários para obtenção dos resultados e para elaborar os gráficos que representam os resultados obtidos.

4 ANÁLISE DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

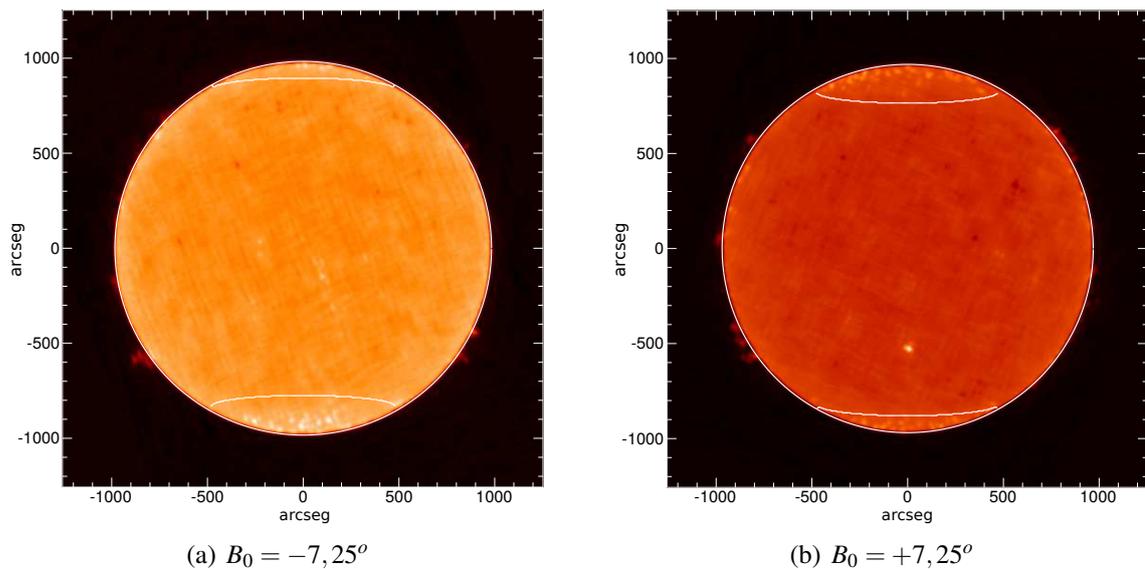
Para estudar a variação do brilho médio polar em 17 GHz e sua relação com as medidas em EUV foram utilizadas duas metodologias distintas:

- estudar a contribuição das fontes compactas polares observadas em 17 GHz e em EUV, medidas para as latitudes acima de $\pm 60^\circ$ do disco solar.
- analisar as variações angular e temporal do brilho solar por meio de mapas sinópticos do limbo em rádio e em EUV.

4.1 Brilho médio das regiões polares

Esta análise segue a metodologia proposta por Nitta *et al.* (2014), cujo o brilho polar médio foi calculado para as latitudes acima de 60° (norte) e abaixo de -60° (sul). Estas regiões foram delimitadas a partir do procedimento ‘arcm2hel.pro’ (SSW), que converte a posição de cada *pixel* na posição de latitude e longitude em relação à imagem observada, levando em consideração a variação de $-7,25^\circ \leq B_0^1 \leq 7,25^\circ$. A Figura 16 mostra um exemplo da exposição dos polos do Sol em 17 GHz devido à inclinação mínima (Figura 4.17(a)) e máxima (Figura 4.17(b)) de B_0 .

Figura 16 - Imagens do Sol em rádio (17 GHz) do NoRH com os polos delimitados a $\pm 60^\circ$ de latitude, considerando-se a inclinação a) mínima (06/03/2009) e b) máxima (08/09/1996) de B_0 .



Fonte: adaptado de NoRH (2014)

¹ B_0 é a inclinação do eixo de rotação do Sol em relação ao plano da eclíptica, produzindo uma variação sazonal, em média de um ano, da exposição dos polos solares para a Terra.

Os objetivos deste estudo são:

- 1) calcular a variação da contribuição para o brilho médio polar em 17 GHz das fontes compactas observadas nos polos, entre 1992 e 2014 e
- 2) comparar as mudanças no brilho médio polar em 17 GHz com as médias observadas em três linhas do EUV (1600 Å, 304 Å e 171 Å).

4.1.1 Mapas em 17 GHz

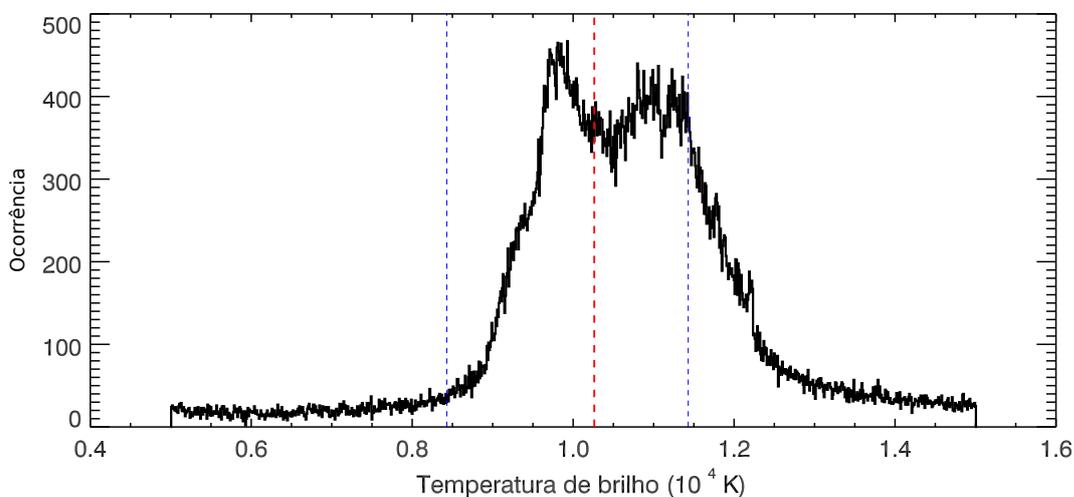
Nesta seção são descritos os procedimentos utilizados para o estudo do comportamento do brilho polar médio em 17 GHz.

4.1.1.1 Cálculo do raio solar em 17 GHz

Para delimitar a região polar a ser estudada faz-se necessário calcular o raio solar de cada mapa, visto que este varia com o ciclo de atividade solar (veja por exemplo: Costa *et al.* (1999) e Selhorst *et al.* (2011)). Seguindo Costa *et al.* (1999) o raio foi definido como sendo a posição em que a temperatura de brilho cai para 50% do valor do Sol calmo.

O Sol calmo é calculado por meio de um histograma da matriz de temperaturas de cada mapa analisado. A Figura 17 mostra um exemplo de histograma do mapa em 17 GHz do NoRH da imagem de 27/01/2002. Nesse mapa, o Sol calmo ($sc = 10262$ K) é representado pela linha vermelha no gráfico. As linhas azuis delimitam a região do histograma que é utilizada para cálculo do sc.

Figura 17 - Histograma do mapa do Sol em 17 GHz do NoRH de 27/01/2002. A linha vermelha representa o Sol calmo ($sc = 10262$ K) e as linhas azuis os limites inferior e superior da região utilizada para efetuar o cálculo.



Fonte: o Autor

Após construído o histograma, o valor do Sol calmo é definido de acordo com a Equação 1:

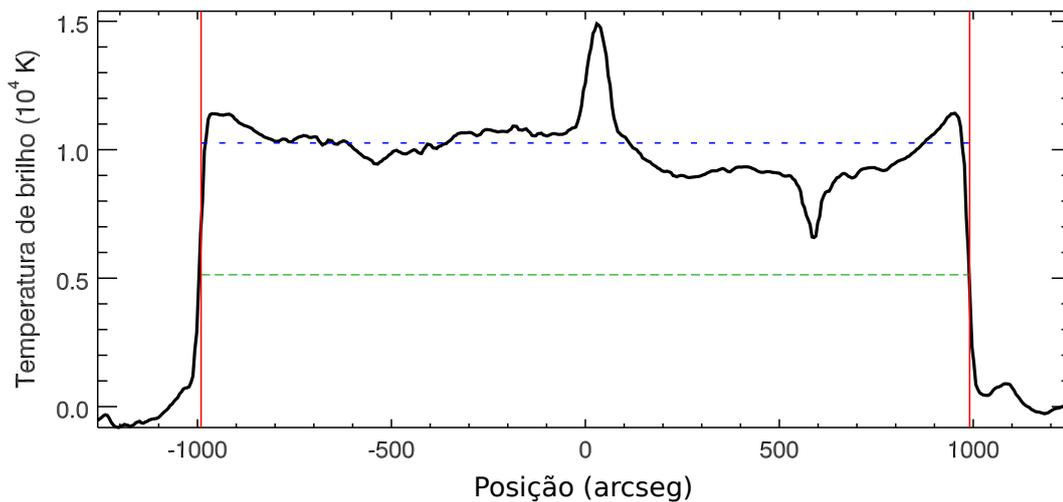
$$sc = \frac{\sum_{i=lim_0}^{lim_9} h_i \times xh_i}{\sum_{i=lim_0}^{lim_9} h_i} \quad (1)$$

onde

- sc = Sol calmo (K – linha vermelha);
- h = eixo y - frequência (contagem de cada ocorrência);
- lim₀ = limite inferior do pico (K – linha azul à esquerda de sc);
- lim₉ = limite superior do pico (K – linha azul à direita de sc) e
- xh = eixo x do histograma (K – valores das ocorrências).

O Sol calmo está indicado na linha horizontal azul (sc = 10262 K) da Figura 18, que mostra um exemplo do perfil de temperatura de brilho do mapa do NoRH em 27/01/2002. A linha verde indica 50% do valor do sc e as linhas vermelhas indicam o raio solar ($R_{\odot} = 990,73'' \pm 1,44''$) encontrado.

Figura 18 - Perfil de temperatura sul/norte da imagem em 17 GHz do NoRH de 27/01/2002 para cálculo do raio médio ($R_{\odot} = 990,73'' \pm 1,44''$ – linhas vermelhas) em 50% (linha verde) do Sol calmo (linha azul).



Fonte: o Autor

Para evitar a influência de regiões ativas, optou-se pelo uso somente da região polar para o cálculo do raio. Esse procedimento é similar ao utilizado por Selhorst *et al.* (2011):

a) em uma região de 60° em torno de cada polo foram feitos cortes radiais a cada $0,25^\circ$ graus passando pelo centro do mapa, resultando em 240 pontos sobre o limbo de cada

polo (Figura 19);

b) uma circunferência foi ajustada a esses pontos e foi calculado um desvio padrão para os raios encontrados;

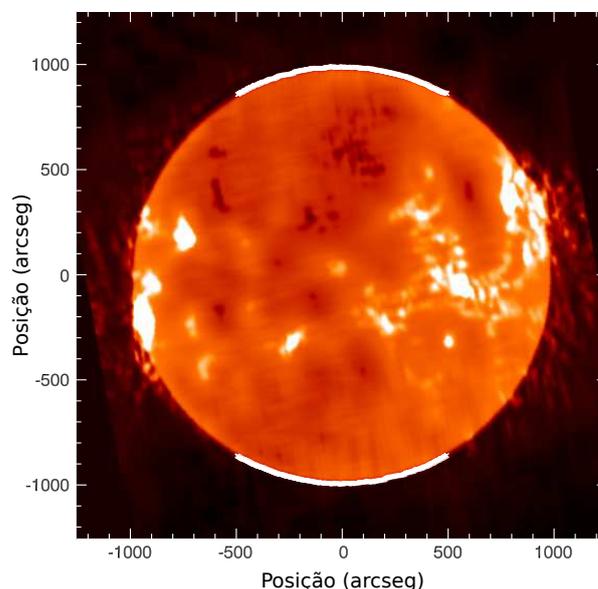
c) foi feito um novo ajuste, considerando somente os pontos em que a diferença entre eles e o primeiro ajuste fosse menor que o desvio padrão. Essa etapa foi feita afim de desconsiderar regiões ativas e proeminências no limbo do Sol para que as medidas se tornassem mais precisas;

d) os raios angulares foram normalizados para a distância de 1 U.A. e

e) o raio solar foi extraído a partir do segundo ajuste bem como o desvio padrão.

A definição do raio solar serve de base para delimitar a região polar acima de $\pm 60^\circ$ que será analisada neste trabalho.

Figura 19 - Imagem do Sol em 17 GHz do NoRH de 27/01/2002 com 240 pontos em cada polo, delineando 60° , utilizados para cálculo do raio médio em 50% do brilho.



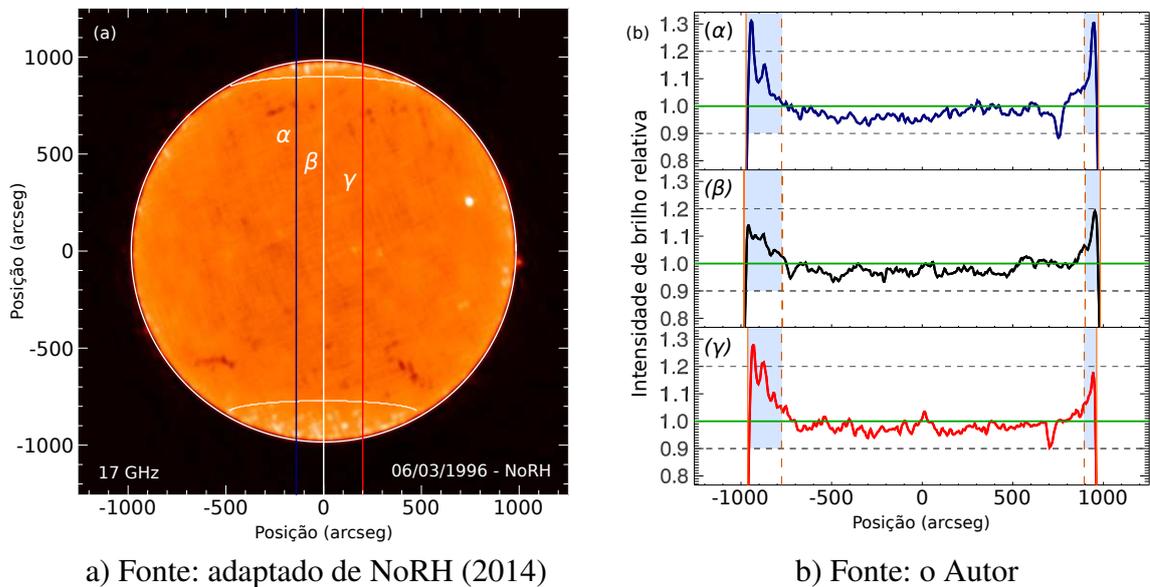
Fonte: adaptado de NoRH (2014)

4.1.1.2 Procedimento de cálculos das médias polares

Com o objetivo de observar as características em cada perfil da temperatura de brilho (T_b) foram feitos três cortes longitudinais arbitrários (α, β, γ). A Figura 20 ilustra este procedimento no mapa de 06/03/1996. Esse mapa está inserido no período em que o polo sul do Sol está mais exposto que o polo norte ($B_0 = 7,25^\circ$). Os perfis estão demonstrados na figura em

razão do Sol calmo ($sc = 10432$ K), que está indicado pelas linhas verdes horizontais. As regiões analisadas, compreendidas entre o limbo solar ($R_{\odot} = 983,78'' \pm 1,27''$) e $\pm 60^{\circ}$ estão destacadas em azul. As temperaturas de brilho que atingem valores acima de 1,2 sc (perfil α – polos sul/norte e perfil γ – polo sul) são características das fontes compactas brilhantes que causam o abrilhantamento do limbo (por exemplo, Shibasaki (1998)). No entanto, as regiões do perfil β e o norte do perfil γ não apresentam temperaturas acima de 1,2 sc.

Figura 20 - Exemplo de perfis longitudinais de imagem do NoRH em 17 GHz de 06/03/1996 para verificação de parâmetros limítrofes das regiões analisadas. Nesta imagem, $sc = 10432$ K (linhas verdes) e o limbo (linhas verticais laranjas). O perfil α (azul-marinho) está em $-140''$ no mapa e possui seus limites de $\pm 60^{\circ}$ em $-787,34''$ e em $905,20''$ a partir do centro em direção aos polos sul e norte, respectivamente. O perfil β (branco) está em $0''$ e tem seus valores de $\pm 60^{\circ}$ em $-772,60''$ (sul) e $900,29''$ (norte) e o perfil γ (vermelho), em $200''$ do mapa, com $-797,16''$ (sul) e $915,02''$ (norte), todos sinalizados pelas linhas verticais tracejadas laranjas.



Dentro da região determinada foram feitas as médias dos dados com a T_b superior a 0,9 sc e as médias dos dados considerando a T_b entre 0,9 sc e 1,2 sc.

O limite em 0,9 sc abrange a maioria dos pontos acima da superfície solar e, com base nos estudos de Shibasaki (1998) e de Selhorst *et al.* (2003), para se verificar a influência das fontes compactas, é determinado um limite em 1,2 sc. Portanto, para o estudo proposto, somente nas regiões azuladas demonstradas na Figura 20 é que são feitas as médias em cada polo. Elas são delimitadas na parte inferior e superior pelos limites 0,9 sc e 1,2 sc (linhas cinzas tracejadas) e pelos limites laterais entre o limbo (linhas laranjas) e 60° lat para o norte e -60° lat para o sul (linhas laranjas tracejadas).

Para selecionar as regiões polares acima de $\pm 60^{\circ}$, construiu-se uma matriz de “zeros e uns”, para cada mapa analisado, de mesma dimensão, mesmo raio e mesmo índice de B_0 do respectivo mapa. Os *pixels* compreendidos entre os limites pretendidos receberam o valor 1 (um)

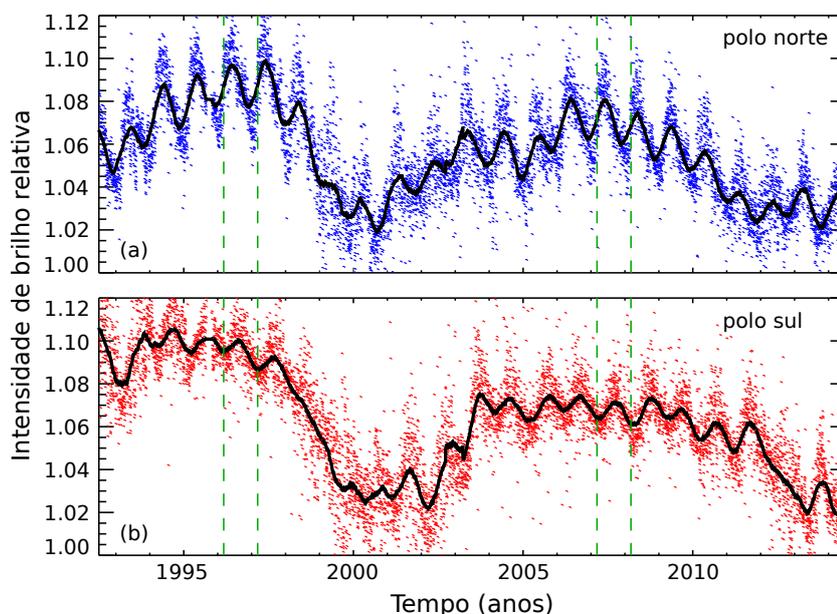
e os demais o valor 0 (zero). Essa matriz de unidades foi multiplicada pelo mapa analisado para descartar as regiões fora da área de interesse, restando somente os dados cercados pelo limite definido nos polos.

Com esses dados preparados, foram feitas análises e comparações com os dados em extremo ultravioleta que serão apresentados posteriormente.

4.1.1.3 Resultados obtidos em 17 GHz

Os gráficos da Figura 21 mostram os resultados obtidos para as médias polares considerando todos os pontos com $T_b > 0,9$ sc. Esses gráficos foram confeccionados a partir da razão das médias obtidas das temperaturas polares e o Sol calmo. Os dados do polo norte (pontos azuis) e do polo sul (pontos vermelhos) apresentam oscilações que são causadas pela inclinação do Sol em relação ao plano da eclíptica (B_0) que completam seu ciclo em aproximadamente um ano. As linhas verticais verdes indicam os meses de março de 1996, 1997, 2007 e 2008, época em que B_0 é mínimo e o polo sul do Sol está mais exposto do que o polo norte. As curvas pretas são os dados com uma média corrida de 180 dias.

Figura 21 - Intensidade de brilho relativa entre as médias polares do Sol e o Sol calmo em 17 GHz, para a) todas as médias no polo norte (pontos azuis) e b) todas as médias no polo sul (pontos vermelhos). As curvas pretas representam a média corrida de 180 dias. As linhas verdes tracejadas indicam um exemplo de quando $B_0 \sim -7,25^\circ$, época em que a exposição do polo sul é máxima e do polo norte é mínima.



Fonte: o Autor

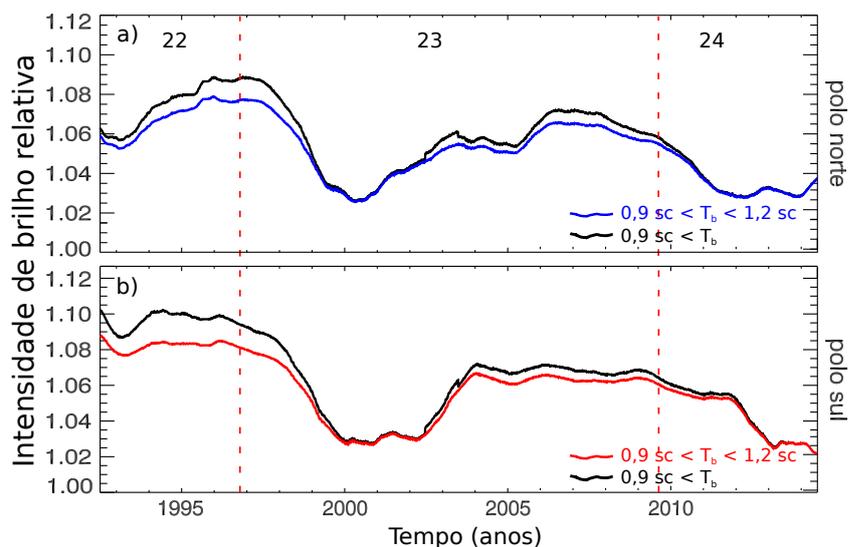
O método sugerido por Nitta *et al.* (2014) e adotado aqui, tinha como objetivo anular a influência do ângulo B_0 nos dados, porém, como pode ser observado na Figura 21, as oscilações

anuais continuam presentes nos resultados.

Além disso, levando em consideração o valor de B_0 , quando o seu valor é mínimo ($B_0 = -7,25^\circ$) e o polo sul do Sol está mais exposto à Terra, as médias encontradas para o polo sul são menores em relação à menor exposição do polo, quando B_0 é máximo ($B_0 = 7,25^\circ$). Esse resultado é observado também para o polo norte de maneira inversa ao polo sul. Um exemplo disso, são as linhas verticais verdes da Figura 21, que indicam os meses de março de 1996, 1997, 2007 e 2008. Elas cortam valores quase máximos da média no polo norte e cortam valores mínimos das médias no polo sul. Isso pode ser explicado pelo fato de que a maior área de exposição mostra mais valores próximos ao Sol calmo, ou seja, mostra mais regiões com temperaturas menores. Esses valores baixos reduzem expressivamente a média calculada naquela região.

A Figura 22 mostra os resultados com média corrida de 360 dias, para o brilho polar médio em 17 GHz para os casos em que todos os pixels com temperaturas acima de 0,9 sc são considerados (curvas pretas) e para o caso em que os pixels com intensidades acima de 1,2 sc não foram considerados (curvas azuis) para os dois polos. As linhas verticais vermelhas indicam, didaticamente, a fronteira entre os ciclos 22, 23 e 24 de atividade solar. Elas foram estabelecidas conforme os períodos de menor atividade pelo número de manchas, segundo Hathaway (2014).

Figura 22 - Intensidade de brilho relativa das médias polares e o Sol calmo em 17 GHz, com média corrida de 360 dias, para 0,9 sc (curvas pretas) e entre 0,9 e 1,2 do sc (curvas azuis). As linhas vermelhas mostram, didaticamente, o limite entre os ciclos solares.



Fonte: o Autor

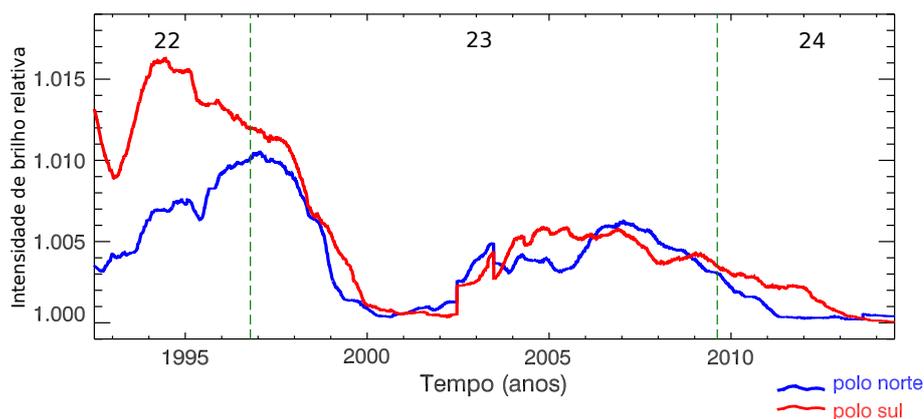
No período de mínimo entre os ciclos 22/23, quando os cálculos são restringidos de 0,9 sc até 1,2 sc essas médias atingem os percentuais de 8,5% e 9,0%, nos polos norte e sul, respectivamente. Porém, nos cálculos das médias das T_b superiores a 0,9 sc, a contribuição

do abrilhantamento atingiram aproximadamente até 10,0% e 10,8% para os polos norte e sul, respectivamente. Essa diferença de aproximadamente 1,5% (polo norte) e de 2% (polo sul) evidenciam que as fontes compactas quentes contribuíram para o aumento do brilho polar acima de 1,2 sc.

Durante o mínimo seguinte, entre os ciclos 23/24, esses valores atingiram em torno de 8,2% para o polo norte e 7,5% para o polo sul, quando considerados todas as temperaturas acima de 0,9 sc. Quando calculados com o limite superior em até 1,2 sc, esses valores passam para 7,2% e para 7% para os polos norte e sul, respectivamente. Nesse caso, as diferenças passam a ser de 1% (polo norte) e de 0,5% (polo sul).

Comparando-se os dois mínimos, constata-se que houve uma redução, de quase 2% para o polo norte e de mais de 3% para o polo sul, do mínimo entre os ciclos 22/23 para o último mínimo, entre os ciclos 23/24. Além disso, é visível a redução da contribuição de estruturas quentes ($T_b > 1,2$ sc) durante o mínimo 23/24 em relação ao mínimo anterior.

Figura 23 - Razão entre as médias polares em 17 GHz em que 1,2 sc são excluídas quando todos os pontos foram considerados.



Fonte: o Autor

Para verificar a contribuição percentual das fontes com $T_b > 1,2$ sc, um segundo gráfico (Figura 23) foi projetado, no qual é calculada a razão entre as médias polares em que as temperaturas acima de 1,2 sc foram excluídas em relação à média na qual todos os pontos foram considerados (curvas preta e azul da Figura 22). A contribuição das fontes compactas quentes é maior durante o mínimo 22/23, atingindo um máximo de contribuição de 16% no sul. A contribuição destas regiões reduziu significativamente do ciclo 23 para o 24, atingindo o máximo de 6% e, atualmente, atingem valores da contribuição do abrilhantamento praticamente nulos.

4.1.2 Mapas em extremo ultravioleta

Os procedimentos utilizados em EUV são semelhantes aos adotados para as análises em rádio, porém com suas respectivas peculiaridades descritas nessa seção.

4.1.2.1 Cálculo do raio solar em ultravioleta

O raio solar em EUV foi definido utilizando-se os estudos de Giménez de Castro *et al.* (2007), em que eles determinaram os raios médios (rm) durante o ciclo 23 para a emissão do He II e Fe IX,X correspondentes aos comprimentos de onda de 304 Å e 171 Å, respectivamente. Eles encontraram para a linha de emissão de 171 Å o raio médio igual a 969,54'' ($\pm 0,02''$) e para 304 Å o raio médio igual a 967,56'' ($\pm 0,04''$).

- Imagens em 171 Å

Foi feita a razão entre o raio médio (rm) e a média dos raios ópticos (r_{op}) de todo o período analisado, obtidos no *header* das imagens. O raio considerado em cada imagem foi obtido multiplicando seu raio óptico (r_{op}) pelo valor encontrado da razão, como demonstrado na Equação 2.

$$r_{ad} = r_{op} \times \frac{rm}{\overline{r_{op}}} \text{ [arcseg]} \quad (2)$$

onde

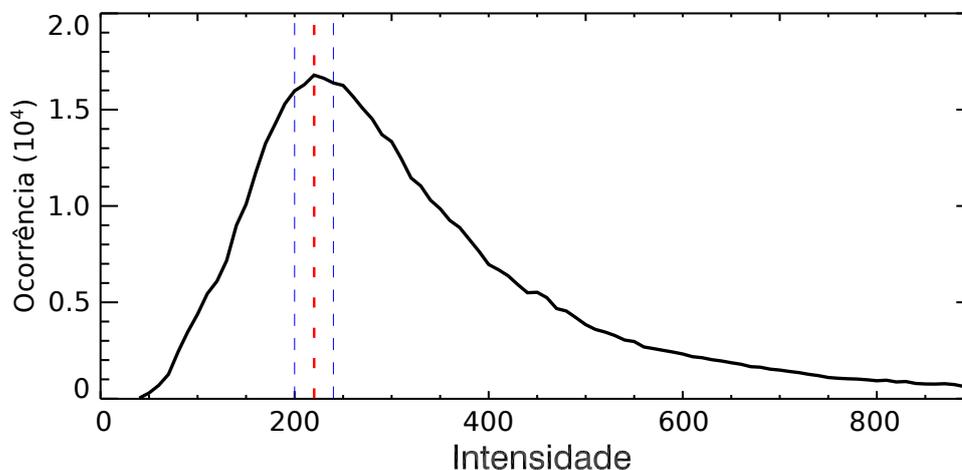
- r_{ad} = raio adotado;
- r_{op} = raio óptico, fornecido no *header* de cada imagem;
- rm = raio médio, calculado por Giménez de Castro *et al.* (2007) e
- $\overline{r_{op}}$ = média dos r_{op} de todo o período estudado.

O Sol calmo é calculado por meio do histograma da matriz de cada imagem, considerando-se somente a região contida dentro do raio solar. Isso tornou-se necessário devido à presença de estruturas com intensidades fora do disco com temperaturas iguais ou maiores que as da superfície, as quais interferiam no cálculo do Sol calmo.

As imagens em 171 Å possuem um histograma semelhante ao exemplo da Figura 24, obtido da imagem de 06/03/2011. O Sol calmo ($sc = 230$) é encontrado de acordo com a Equação 1 e seguindo os limites determinados para ultravioleta (± 20 pontos). As linhas azuis indicam os limites inferior e superior utilizados pela Equação 1. Os dados foram agrupados em intervalos de dez e os limites inferior e superior foram definidos em 2 grupos abaixo e dois grupos acima da intensidade de maior frequência no histograma.

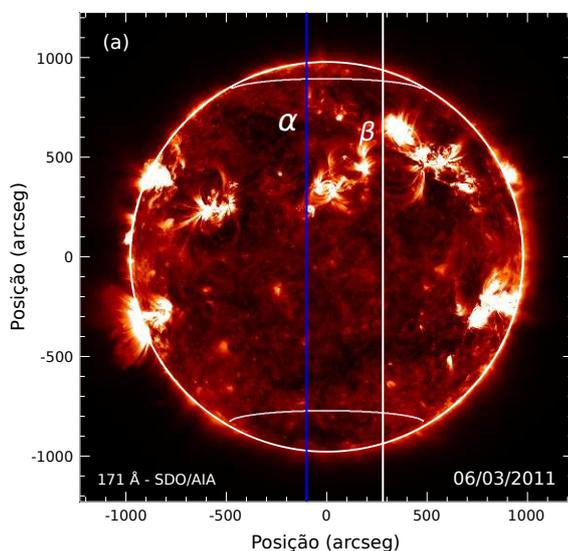
Para exemplificar as características do perfil de intensidade em 171 Å, a Figura 4.1.2.1 mostra dois perfis normalizados pelo Sol calmo ($sc = 230$) indicado pela linha verde e, mostra também a linha horizontal tracejada cinza que indica 0,5 sc , as linhas verticais laranjas que indicam o limbo solar ($R_{\odot} = 977,83'' \pm 0,06''$), as linhas verticais tracejadas que indicam -60° de latitude sul = $-795,43''$ e 60° de latitude norte = $908,23''$ para o perfil α e $-773,83''$ e $893,83''$ para o perfil β para o sul e norte, respectivamente e, por fim, as regiões estudadas que estão delimitadas entre o raio e os limites de $\pm 60^{\circ}$ que estão destacadas em azul.

Figura 24 - Histograma obtido da imagem de 06/03/2011 em 171 Å do SDO/AIA. O Sol calmo ($sc = 230$) é indicado pela linha vermelha e os limites, inferior (lim_0) e superior (lim_9), são indicados pelas linhas azuis.

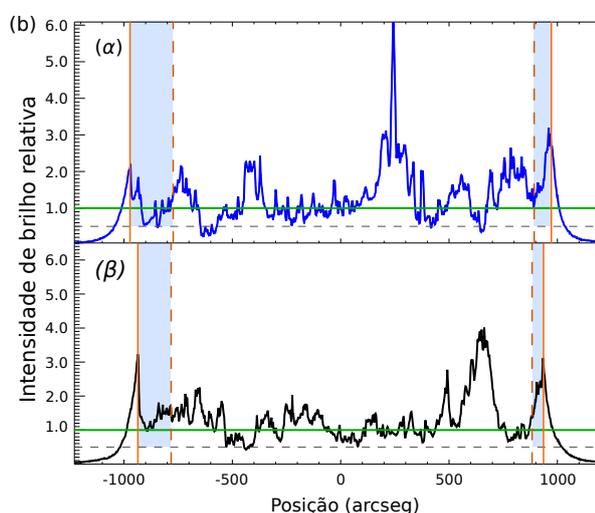


Fonte: o Autor

Figura 25 - a) Imagem do Sol em 171 Å do SDO/AIA de em 06/03/2011. b) Perfis de temperatura α e β . O limbo é indicado pelas linhas verticais laranjas, o Sol calmo ($sc = 230$) pelas linhas verdes, 0,5 sc pelas linhas tracejadas cinzas, $\pm 60^\circ$ de latitude sul e norte pelas linhas tracejadas verticais laranjas e as regiões analisadas destacadas em azul.



a) Fonte: adaptado de NoRH (2014)



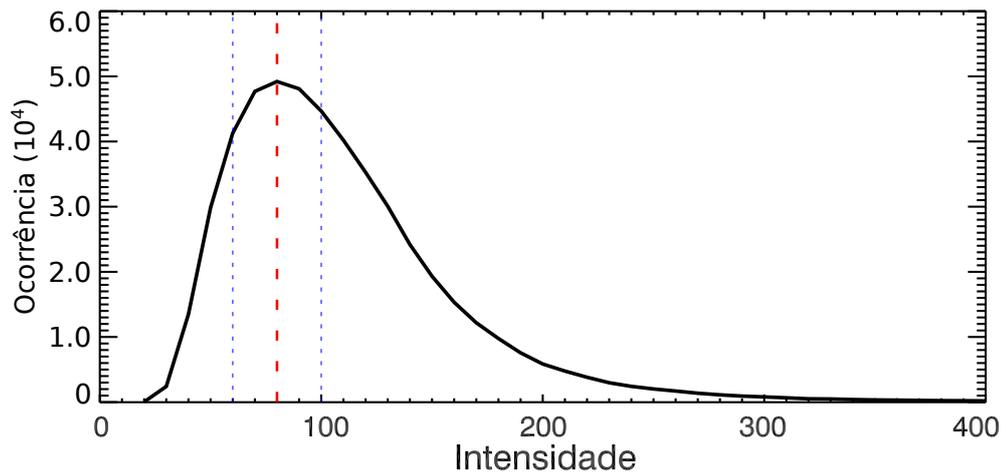
b) Fonte: o Autor

- Imagens em 304 Å

Em 304 Å, o raio solar é calculado também de acordo com a Equação 2 utilizando o raio médio obtido por Giménez de Castro *et al.* (2007). O histograma de cada imagem para cálculo do Sol calmo em 304 Å é exemplificado na Figura 26 obtido da imagem de 08/09/2010. Nele, o valor do Sol calmo encontrado é de 80,31 e está indicado no gráfico pela linha vertical vermelha. As linhas azuis indicam os limites inferior e superior utilizados pela Equação 1. Os

dados foram associados em grupos de dez e os limites inferior e superior foram definidos em 2 grupos abaixo e dois grupos acima da intensidade de maior frequência no histograma.

Figura 26 - Histograma obtido da imagem de 08/09/2010 em 304 Å do SDO/AIA (sc = 80 – linha vermelha). As linhas azuis indicam os limites inferior (lim_0) e superior (lim_0) utilizados para cálculo do Sol calmo.



Fonte: o Autor

Para ilustrar as características do perfil de intensidade em 304 Å, foram feitos cortes longitudinais de sul a norte na imagem obtida em 08/09/2010. A Figura 4.1.2.1 mostra dois perfis normalizados pelo Sol calmo (sc = 80) indicado pela linha verde em cada perfil e, mostra também a linha horizontal tracejada cinza que indica 0,5 sc, as linhas verticais laranjas que indicam o limbo solar ($R_{\odot} = 960,90'' \pm 0,09''$), as linhas verticais tracejadas que indicam -60° de latitude sul = $-884,10''$ e 60° de latitude norte = $766,50''$ para o perfil α e $-910,50''$ e $812,10''$ para o perfil β para o sul e norte, respectivamente e, por fim, as regiões estudadas que estão delimitadas entre o raio e os limites de $\pm 60^{\circ}$ que estão destacadas em azul.

- Imagens em 1600 Å

Em 1600 Å, foi utilizado o raio óptico contido no *header* da imagem. O Sol calmo foi determinado pela construção de um histograma para cada imagem analisada. Um exemplo disso, é o histograma da imagem de 08/09/2010, mostrado na Figura 28. A linha vermelha na figura representa o Sol calmo (sc = 180) e as linhas azuis representam os limites inferior e superior que foram definidos em ± 20 em relação a intensidade de maior frequência no histograma.

As características do perfil das imagens em 1600 Å são demonstradas no exemplo da Figura 29 que mostra dois perfis normalizados pelo Sol calmo (sc = 180) indicado pela linha verde em cada perfil. As linhas horizontais tracejadas cinzas indicam 0,5 sc, as linhas verticais laranjas indicam o limbo solar, as linhas verticais tracejadas laranjas indicam -60° de latitude sul = $-885,24''$ e 60° de latitude norte = $767,64''$ para o perfil α e $-911,64''$ e $813,24''$ para o perfil β para o sul e norte, respectivamente. As regiões estudadas que estão delimitadas entre o raio e os limites de $\pm 60^{\circ}$ que estão destacadas em azul.

Figura 27 - a) Imagem do Sol em 304 Å do SDO/AIA em 08/09/2010. b) Perfis de temperatura α e β . O limbo é indicado pelas linhas verticais laranjas, o Sol calmo ($sc = 80$) pelas linhas verdes, 0,5 sc pelas linhas cinzas, $\pm 60^\circ$ de latitude sul e norte pelas linhas tracejadas verticais laranjas e as regiões analisadas destacadas em azul.

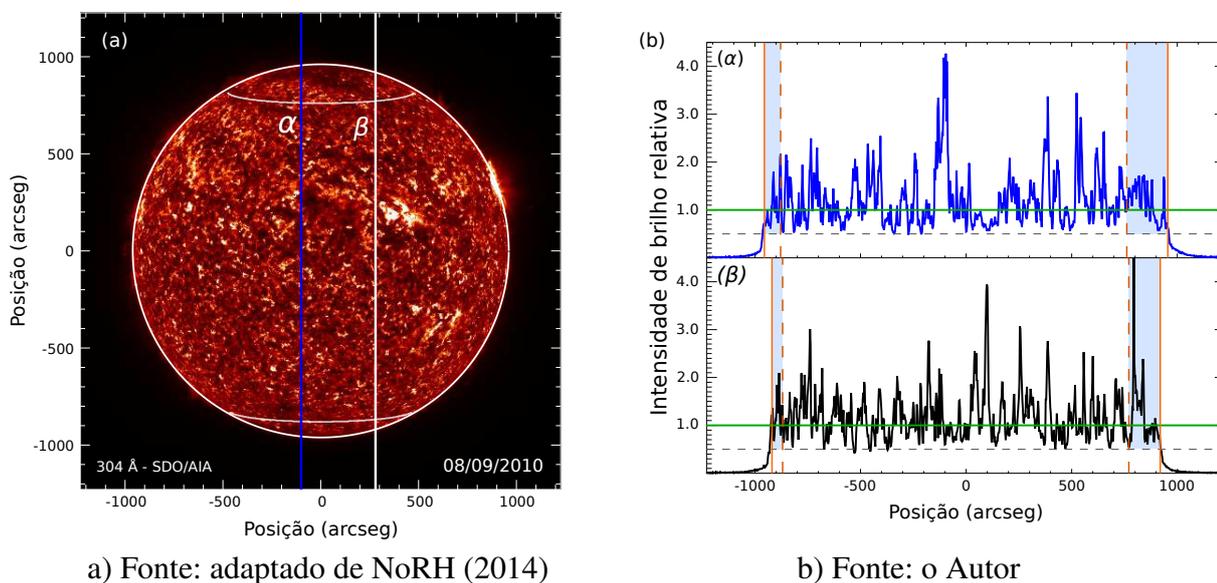
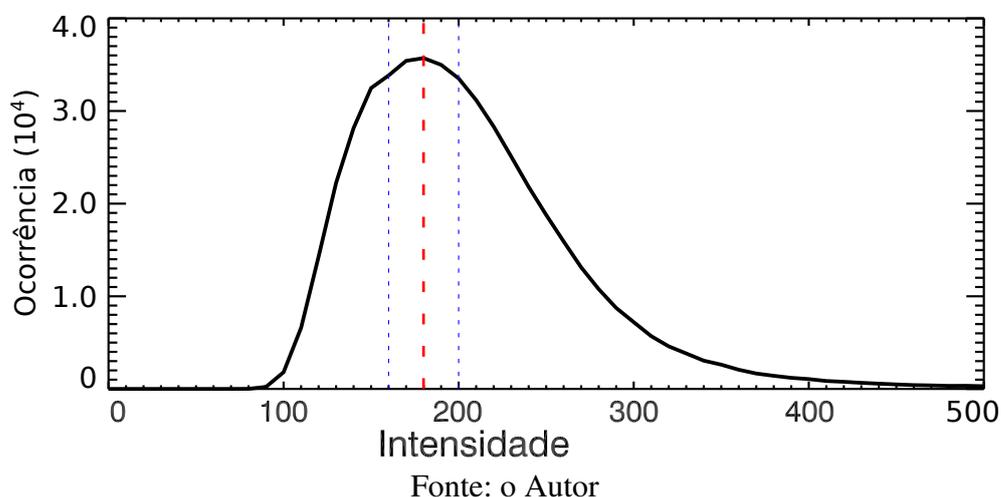


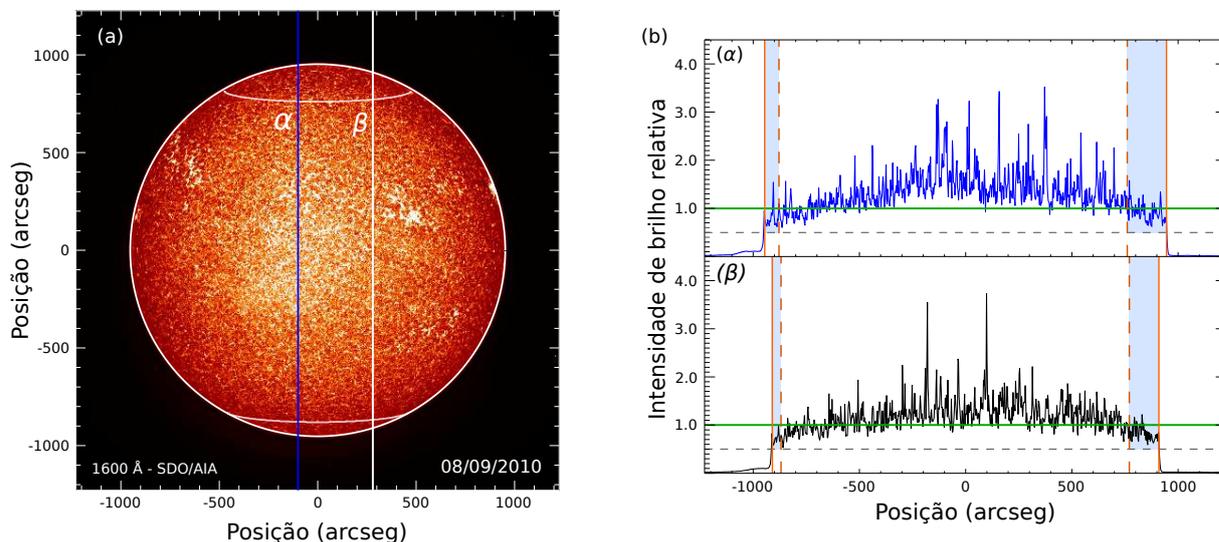
Figura 28 - Histograma obtido da imagem de 08/09/2010 em 1600 Å do SDO/AIA ($sc = 180$ – linha vermelha). As linhas azuis indicam os limites inferior (lim_0) e superior (lim_9) utilizados para cálculo do Sol calmo.



4.1.2.2 Resultados obtidos em ultravioleta

Os resultados em 171 Å estão apresentadas na Figura 30a que mostra todas as médias do polo norte (pontos azuis) e na Figura 30b que mostra todas as médias do polo sul (pontos vermelhos). As curvas pretas, em ambos os gráficos, são as médias polares com uma média corrida de 360 dias. As curvas pretas, em 2010, mostram as intensidades de brilho médias de

Figura 29 - a) Imagem do Sol em 1600 Å do SDO/AIA de em 08/09/2010. b) Perfis de intensidades α e β . O limbo é indicado pelas linhas verticais laranjas, o Sol calmo ($sc = 180$) pelas linhas verdes, 0,5 sc pelas linhas tracejadas cinzas, $\pm 60^\circ$ de latitude sul e norte pelas linhas tracejadas verticais e as regiões analisadas destacadas em azul.



a) Fonte: adaptado de NoRH (2014)

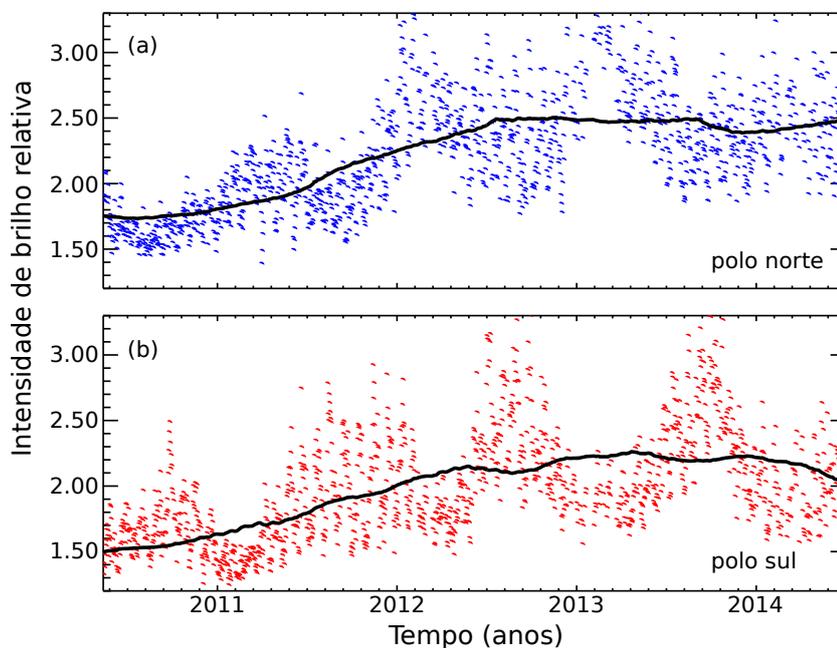
b) Fonte: o Autor

aproximadamente 1,5 sc e de 1,7 sc para os polos sul e norte, respectivamente. Esses percentuais aumentam gradualmente à medida que o ciclo de atividades aumenta e atingem cerca de 2,2 sc (polo sul) e 2,4 sc (polo norte) a partir de 2013. O aumento de mais de 60% em ambos os polos pode ser explicado pelo fato de que a emissão da coroa é menor com a presença de buracos coronais que possuem grande influência na emissão observada e que estão o tempo todo presentes nos polos em períodos de mínimo de atividade (CRANMER, 2009). Portanto, a emissão polar em 171 Å está correlacionada com o ciclo solar, e aumenta com o aumento de atividade equatorial, em concordância com os resultados reportados por Selhorst *et al.* (2010).

Entretanto, no gráfico do comprimento de onda de 304 Å, em que na Figura 31a mostra todas as médias do polo norte (pontos azuis) e a Figura 31b mostra todas as médias do polo sul (pontos vermelhos) e as respectivas curvas pretas, que são as médias polares com uma média corrida de 360 dias, constata-se um decréscimo de cerca de 40% para o polo norte (Figura 31a) e de cerca de 15% para o polo sul (Figura 31b), entre os anos de 2010 e 2014. Esse decréscimo segue a mesma tendência observada em 17 GHz, ou seja, redução da emissão polar associada ao aumento da atividade solar, também concordando com Selhorst *et al.* (2010).

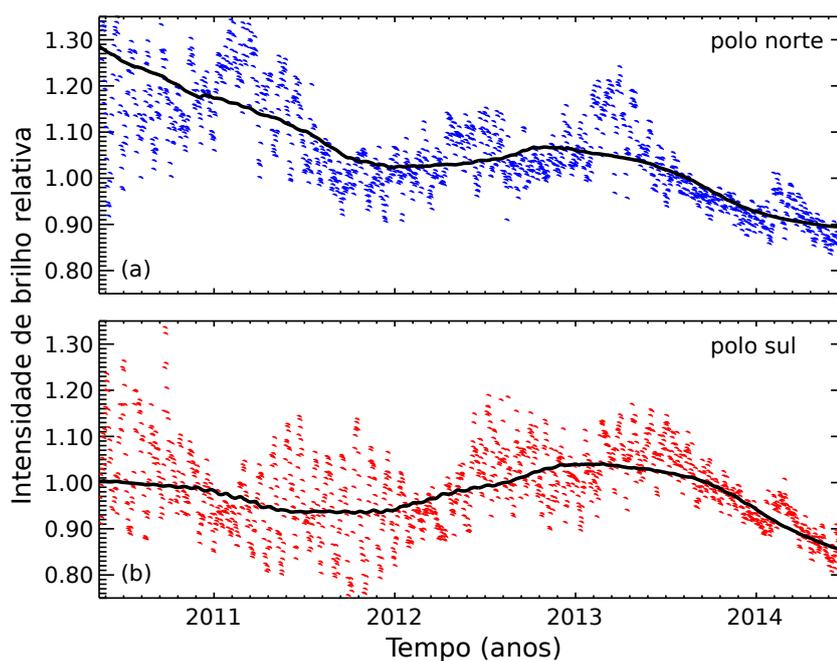
No momento em que se iniciou a análise no comprimento de onda de 1600 Å, foi encontrado um aumento abrupto e inesperado da intensidade de brilho no polo sul em janeiro/2012. Acredita-se que essa alteração é devida a uma calibração ou ajuste ocorrido no instrumento AIA do SDO ou no modo de interpretação de seus dados. A Figura 32 mostra o primeiro perfil encontrado na análise de 1600 Å. Os pontos azuis (Figura 32a) e os pontos vermelhos (Figura 32b) representam todas as médias encontradas para os polos norte e sul, respectivamente. O polo norte mostra um comportamento contínuo de redução temporal de brilho

Figura 30 - Intensidade de brilho nas observações em 171 \AA de mapas do SOD/AIA. Ambos os polos demonstram uma correlação com o ciclo de atividade solar e apresentam um aumento de mais de 60% em relação ao Sol calmo entre 2010 e 2013 tanto no (a) polo norte quanto no (b) polo sul.



Fonte: o Autor

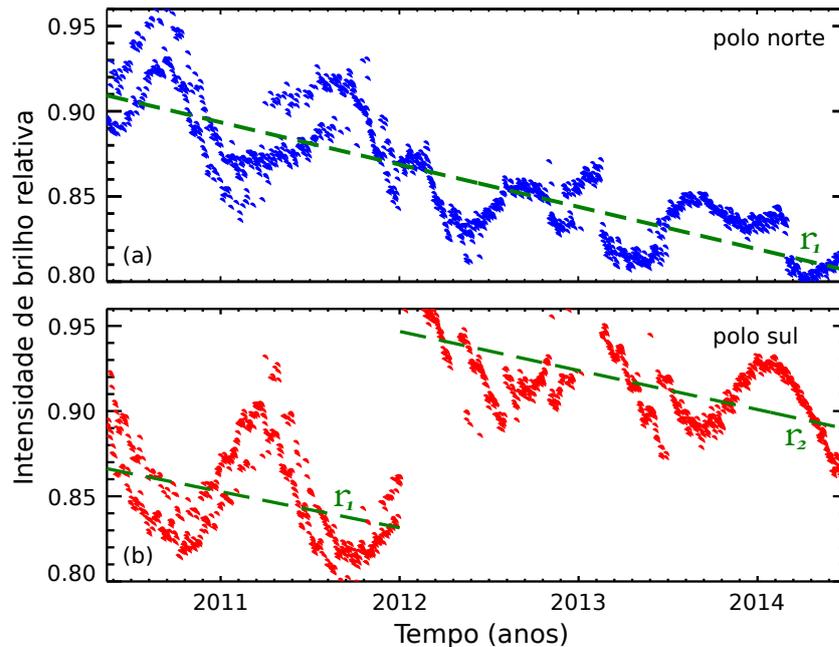
Figura 31 - Intensidade de brilho nas observações em 304 \AA de mapas do SDO/AIA. Ambos os polos demonstram uma anticorrelação com o ciclo solar, apresentando um decréscimo para o (a) polo norte de $\sim 0,40 \text{ sc}$ e para o (b) polo sul de $\sim 0,15 \text{ sc}$, durante o período observado (2010-2014).



Fonte: o Autor

em todo o período analisado. Já no polo sul, é visível a mudança mencionada no início de 2012 e, em seguida, é retomada a variação que segue o mesmo perfil do polo norte.

Figura 32 - Intensidade de emissão polar em 1600 \AA dos mapas obtidos do SDO/AIA. a) médias calculadas no polo norte (pontos azuis) e a reta r_1 de ajuste linear para esses pontos (verde) e b) médias calculadas no polo sul (pontos vermelhos), a reta r_1 do ajuste até 01/01/2012 e a reta r_2 dos ajustes de 2012 até 2014.



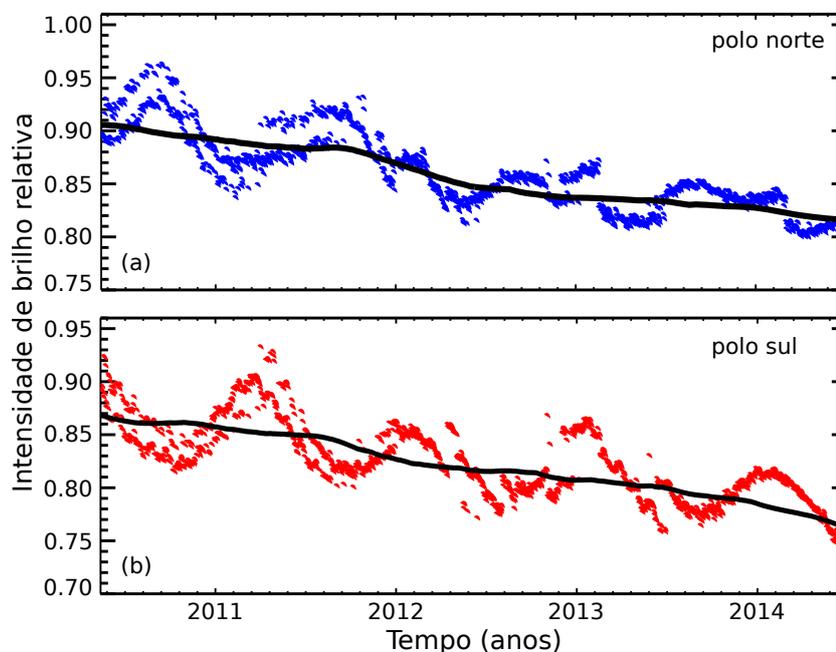
Fonte: o Autor

Em razão disso, foi realizado o método dos mínimos quadrados para encontrar o melhor ajuste para o conjunto de dados, utilizando a função $f(x) = a + bx$. No polo norte, foi feito o cálculo dos coeficientes ($a = 50,78$ e $b = -0,02$) em todo o conjunto de dados. A Figura 32a mostra, ainda, a reta r_1 (verde) resultante do ajuste.

Para o polo sul foi feito um ajuste até 01/01/2012 (y_1) e um outro entre janeiro/2012 e junho/2014 (y_2). A Figura 32b mostra, ainda, a reta r_1 (verde) resultante do ajuste até 2012 e a reta r_2 (verde) resultante do segundo ajuste. Com o propósito de achar um ajuste único para o polo sul, foi calculada a diferença entre os ajustes ($dif = y_2 - y_1$) no ponto de interseção entre as retas (em 01/01/2012) e construída uma única reta ($y = y_1, y_2 - dif$) (Figura 33).

A análise feita em 1600 \AA , levando em consideração os ajustes realizados, mostra uma queda nas médias das intensidades no polo norte (Figura 33a) de $\sim 9,5\%$ e no polo sul (Figura 33b) de $\sim 12,0\%$ em todo o período analisado, representadas pelas curvas pretas, as quais estão com média corrida de 360 dias. As médias encontradas estão representadas na figura pelos pontos azuis para o polo norte e pontos vermelhos para o polo sul. Com isso, pode-se notar que esse comprimento de onda está também anticorrelacionado com o ciclo de atividade solar. Isso já era esperado, visto que a emissão quiescente em 1600 \AA é formada na alta fotosfera e

Figura 33 - Intensidade de emissão ajustada das observações em 1600 \AA de mapas do SDO/AIA. a) polo norte com todos os pontos (azul) e b) polo sul com todos os pontos (vermelho). As curvas pretas representam as respectivas médias corridas de 360 dias. Os polos demonstram uma correlação com o ciclo de atividade solar, apresentando uma queda de (a) $\sim 9,5\%$ para o polo norte e de (b) $\sim 12,0\%$ para o polo sul.



Fonte: o Autor

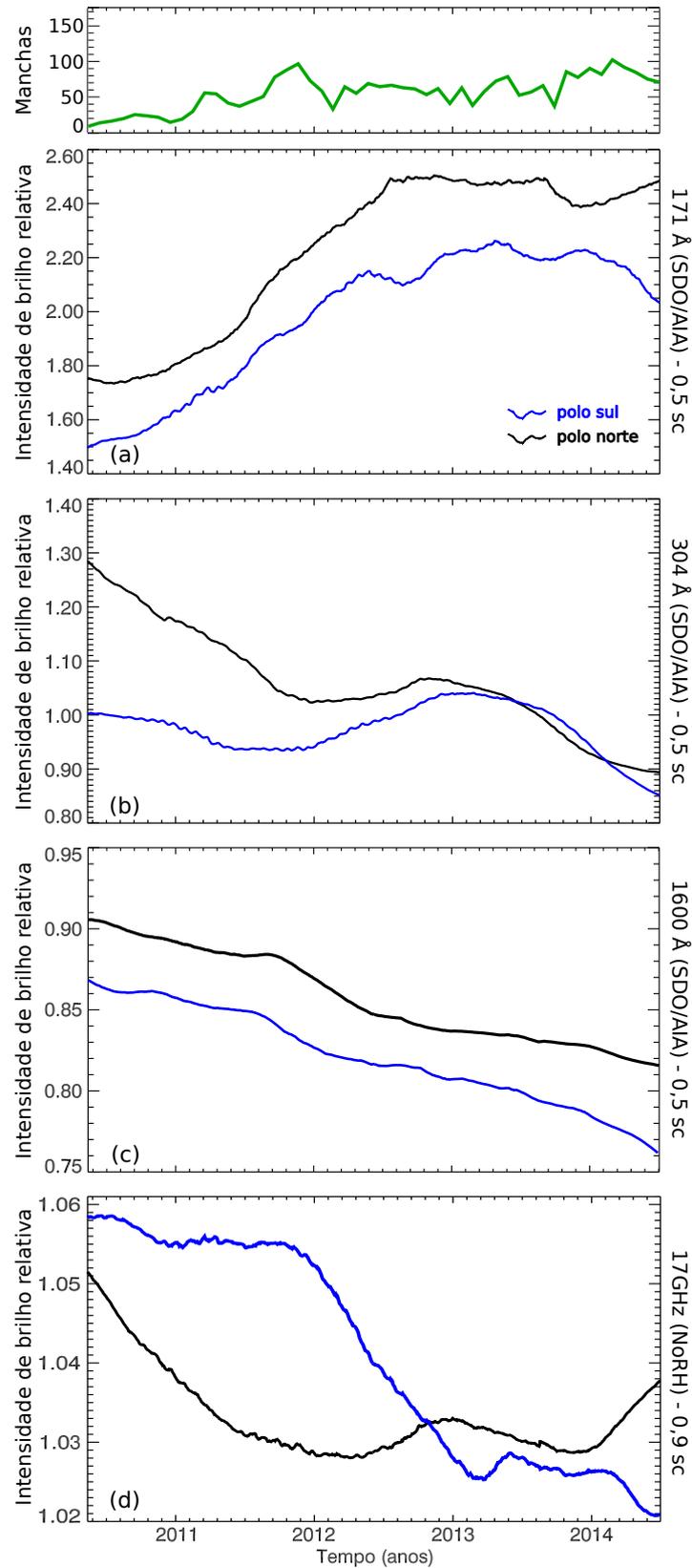
deveria seguir o ciclo de fáculas.

Apesar da mudança abrupta observada nos dados, com o ajuste linear acredita-se que a redução no polo sul foi maior do que a redução no polo norte, o que também se observou em 17 GHz. Vale a pena lembrar que esses dois comprimentos de onda têm emissão em altitudes e temperaturas próximas.

Com o propósito de facilitar a comparação entre os resultados obtidos nesse estudo, os mapas obtidos foram reunidos na Figura 34 em ordem decrescente de altitude na superfície solar. As curvas azuis mostram as médias do polo sul e as curvas pretas mostram as curvas do polo norte. Neles, pode-se observar que as medidas em 171 \AA aumentam com o aumento da atividade solar, enquanto nas demais análises o comportamento é oposto. A correlação do brilho polar em 171 \AA com o ciclo foi reportada anteriormente por Selhorst *et al.* (2010). Nesse mesmo trabalho, os autores também reportaram que as intensidades polares em 304 \AA e 17 GHz variam temporalmente em anticorrelação com o ciclo solar.

Apesar dos resultados em 304 \AA , 1600 \AA e 17 GHz mostrarem redução de intensidade com o aumento da atividade solar, nota-se, na Figura 34, que cada uma das medidas apresentam comportamentos distintos entre si, o que pode ser explicado pelo fato da radiação observada nestes comprimentos de onda terem origem em estruturas diferentes da atmosfera solar. Como exemplo, pode-se citar, o caso das espículas, as quais são completamente transparentes para as linhas do EUV, mas são opticamente espessa quando observadas em 17 GHz e afetam o brilho

Figura 34 - Mapas de intensidades de brilho polar em a) 171 Å, b) 304 Å, c) 1600 Å e d) 17 GHz, calculadas a partir de 2010. As curvas azuis representam o polo sul e as curvas pretas representam o polo norte. Acima, o número de manchas do período (Fonte: NASA).



Fonte: o Autor

nesta frequência (SELHORST *et al.*, 2005). Observa-se também maior intensidade de brilho do polo norte em todas as linhas do EUV, enquanto que em 17 GHz o polo sul mostrou-se dominante durante a maior parte do período estudado.

4.2 Mapas sinópticos de limbo

Em complemento à análise anterior, nesta etapa, é apresentado o estudo da variação da distribuição angular de brilho próximo ao limbo solar. Para isso, foram construídos mapas sinópticos do limbo solar em 17 GHz, a partir dos mapas obtidos pelo NoRH, e comparados com mapas sinópticos em EUV, construídos a partir de imagens obtidas pelo SDO/AIA. Este estudo permite comparar as semelhanças e diferenças entre as emissões rádio e EUV de estruturas solares presentes em latitudes distintas, bem como, verificar a extensão e intensidade dos buracos coronais e, se estes influenciam no aumento de brilho polar observado em 17 GHz.

4.2.1 Procedimentos

São utilizados os mesmos procedimentos do estudo anterior para calcular o raio e o Sol calmo, isto é, o raio solar em 17 GHz foi definido sendo a posição em que a temperatura de brilho cai para 50% do valor do Sol calmo.

Para construir os mapas sinópticos de limbo foi definida uma região interna de 100'' menor que o raio solar. Esta largura representa aproximadamente 60° lat quando B_0 é nulo e os polos estão expostos igualmente.

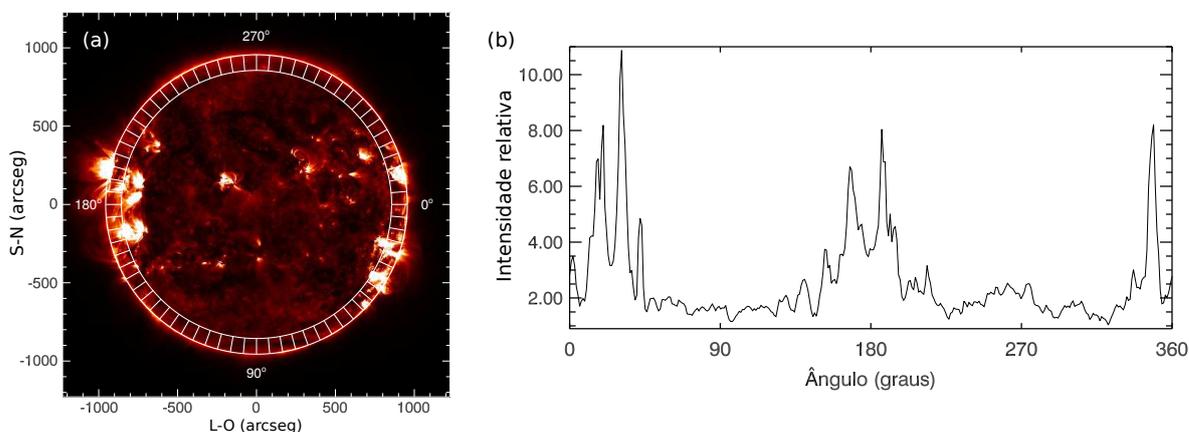
Essa região foi dividida em 360 partes, ou seja, de grau em grau, iniciando-se do lado direito (0°, equador), lado oeste do Sol, em direção ao polo sul (90°), seguindo para o leste (180°, equador), para o polo norte (270°) e retornando ao oeste (360°, equador).

A Figura 35a exibe um exemplo desse procedimento, utilizando o mapa do dia 06/06/2013 em que $B_0 \sim 0,00^\circ$, raio = 955,96'', a distância do raio ao ponto a 60° lat = 855,99'' e a diferença entre eles é de 99,97'', valor abrangido pelo limite de 100''. Em cada polígono delimitado pelo raio, pelos 100'' e por dois graus consecutivos foram calculadas as intensidades médias em rádio e em EUV. O perfil da média de intensidades do exemplo do mapa de 06/06/2013 é exibido na Figura 35b.

4.2.2 Análise dos mapas em 17 GHz

O estudo feito nos mapas em 17 GHz abrange o período de julho/1992 até junho/2014. O perfil do limbo encontrado nos mapas em 17 GHz é exemplificado na Figura 36. Ela mostra uma imagem do dia 15/05/1996 na Figura 36a, em que são observados pontos brilhantes nos polos e a delimitação da região de limbo de 100'' abaixo do raio, esboçada pelas circunferências na cor branca. A Figura 36b mostra a distribuição angular da intensidade relativa ao Sol calmo,

Figura 35 - a) exemplo de imagem em 171 Å (SDO/AIA), de 06/06/2013, com cortes radiais delimitados entre o raio e 100". Método utilizado para a construção do mapa sinóptico do limbo. A região está subdividida a cada 5° para exemplificação, porém nos cálculos foram utilizadas subdivisões a cada 1 grau e b) perfil da intensidade de brilho no limbo da imagem a 100" abaixo do raio solar.



a) Fonte: adaptado de SDO/AIA (2014)

b) Fonte: o Autor

nela observa-se que as maiores intensidades estão localizadas nos polos, onde atingem valores acima de 1,15 sc.

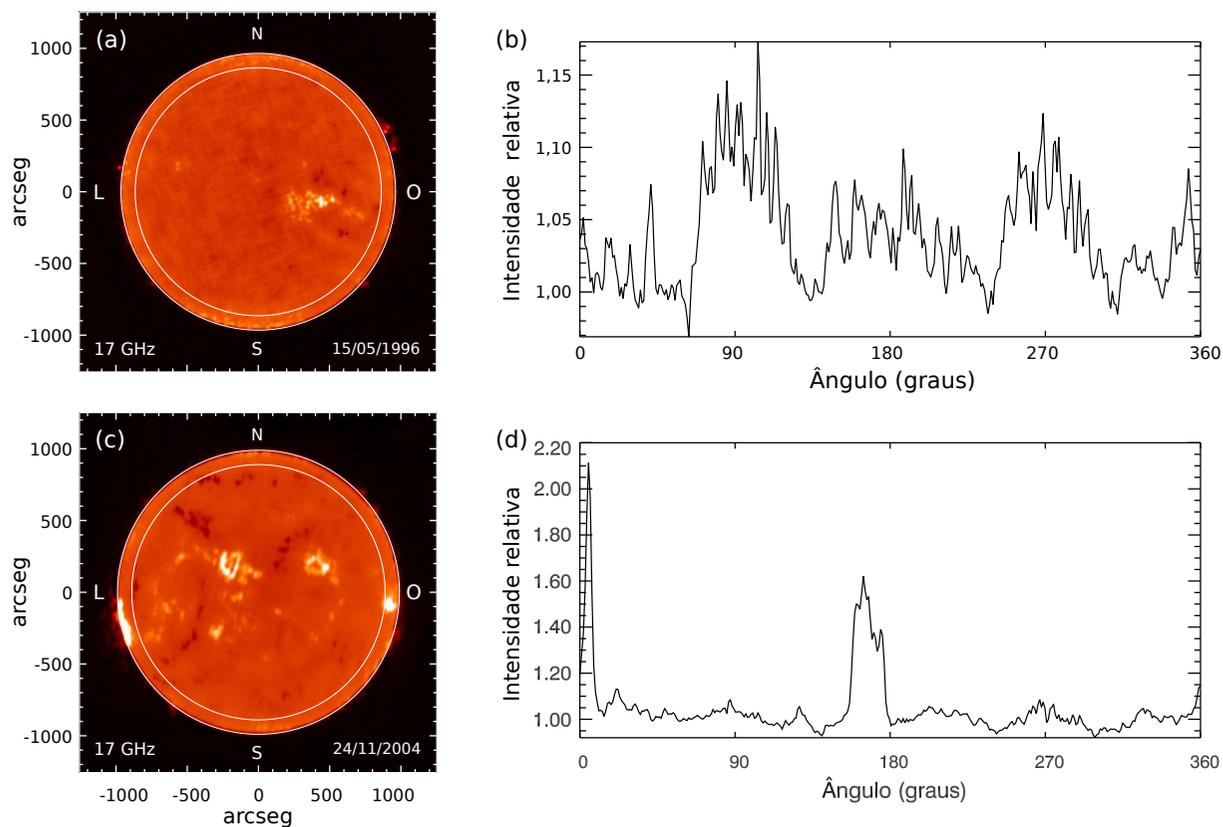
A imagem do dia 24/11/2004 com a região entre 100" e o raio delimitada por circunferências na cor branca é mostrada na Figura 36c, na qual observa-se a presença de regiões ativas na região equatorial. O perfil do limbo dessa imagem é mostrado na Figura 36d, em que se pode notar as regiões ativas em baixas latitudes. A presença de regiões ativas resulta em um aumento de intensidade para valores de até 2,15 sc (ver limbo oeste). Neste exemplo, o aumento de brilho nos polos com valores abaixo de 1,10 sc, torna-se pouco evidente na figura devido à grande intensidade das regiões ativas.

A metodologia foi aplicada para os mapas diários obtidos pelo NoRH (7841 mapas) e os resultados para cada análise foram organizados em uma matriz, na qual as intensidades obtidas em cada posição angular foram distribuídas ao longo do eixo y , enquanto que o eixo x é o tempo.

O resultado de todo o período analisado foi sintetizado na Figura 37. No mapa sinóptico, é observado a evolução temporal dos ciclos de atividade solar, mostrando um esboço do diagrama de borboletas para o limbo, no qual o período entre 1999 e 2001 mostra temperaturas mais elevadas na região equatorial e temperaturas mais frias nos polos. O período a partir de 2010, também mostra o mesmo comportamento, porém com uma menor quantidade de regiões com temperaturas máximas no equador e, nos polos, regiões com menor intensidade relativa de brilho.

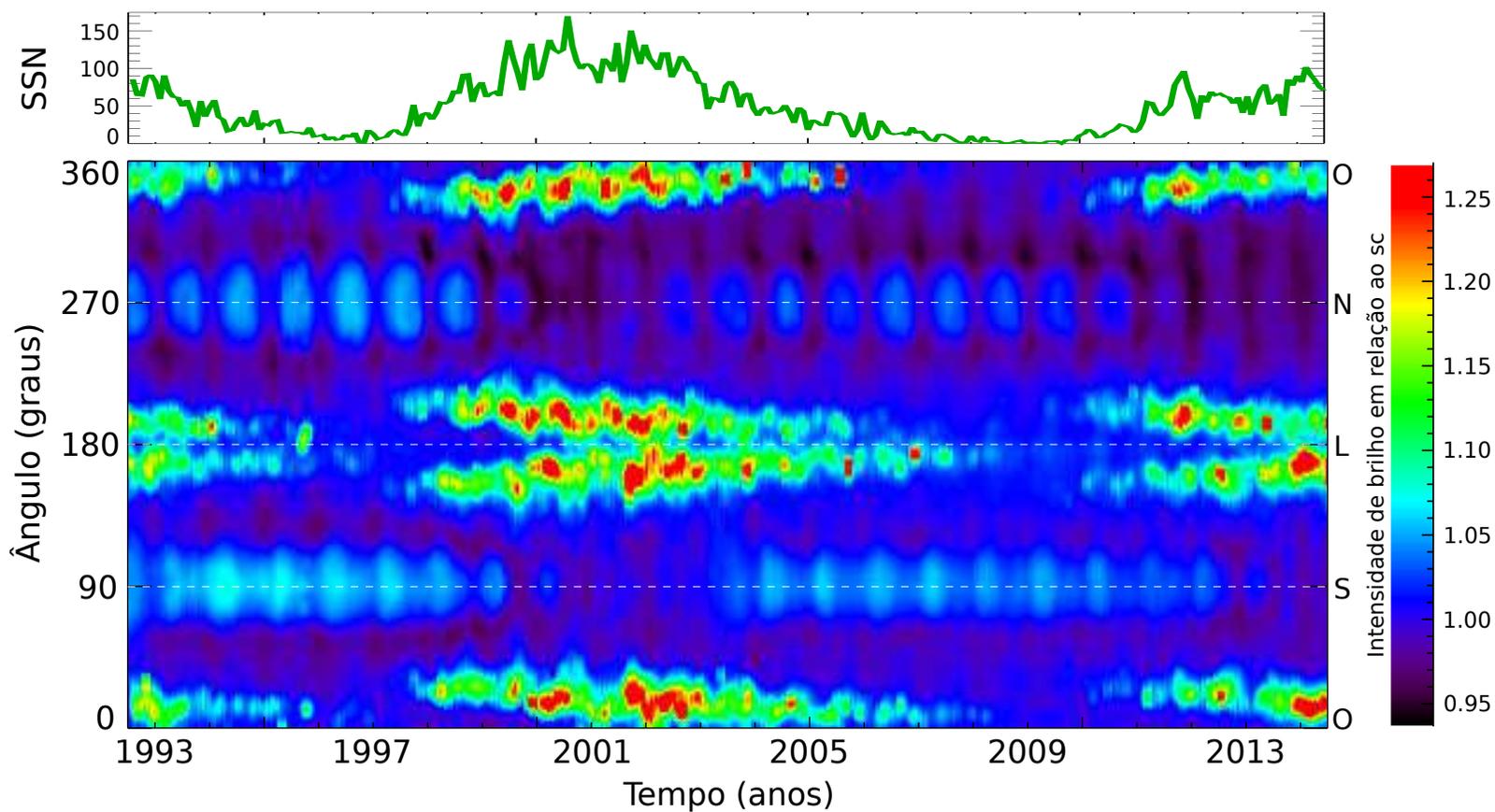
Observando os períodos de mínimo de atividade solar, ainda na Figura 37, entre 1995 e 1998 verifica-se que os brilhos nas regiões polares são bem mais intensos e maiores em relação aos brilhos do mínimo seguinte, entre 2007 e 2010.

Figura 36 - Exemplo das intensidades relativas em 100" no limbo do Sol em 17 GHz (NoRH): a) mapa de 15/05/1996 com as circunferências em branco que indicam o raio e 100" abaixo dele; b) intensidade relativa do limbo de 15/05/1996, em que observa-se aumento de brilho nos polos; c) mapa de 24/11/2004 com a região entre 100" e o raio delimitada por duas circunferências em branco e d) intensidade relativa do limbo em 24/11/2004, em que constata-se regiões ativas em baixas latitudes e aumento de brilho nos polos.



Fonte: o Autor (dados do NoRH (2014))

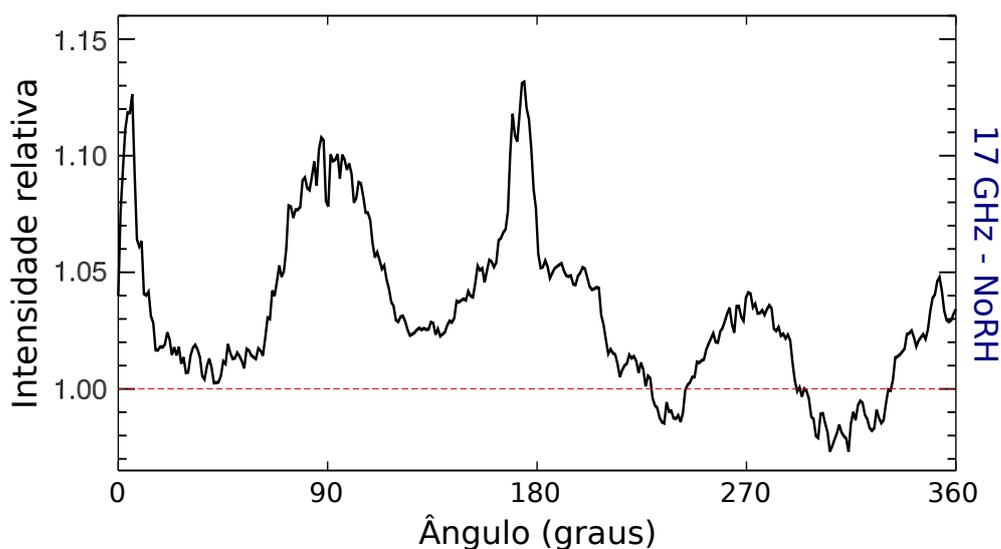
Figura 37 - Mapa sinóptico do limbo solar em 17 GHz, do período de 07/1992 a 06/2014, delimitado em 100" internos ao raio solar. As linhas tracejadas brancas indicam as posições polares (90° e 270°) e a posição equatorial leste, em 180°. Acima, SSN – o número de manchas do período analisado (Fonte: NASA).



Fonte: o Autor

Para melhor analisar a distribuição angular do brilho em 17 GHz, foi feita a média dos resultados obtidos para cada ângulo durante o mês de março/2006. A Figura 38 apresenta o resultado dessa média e mostra que as regiões polares apresentam no mês de março/2006 uma média de aumento de brilho de até 11% no polo sul e de até 4% no polo norte acima do Sol calmo.

Figura 38 - Distribuição angular da média das intensidades de brilhos no limbo solar em 17 GHz para o mês de 03/2006. A linha vermelha assinala o nível do Sol calmo.



Fonte: o Autor (dados do SDO/AIA (2014))

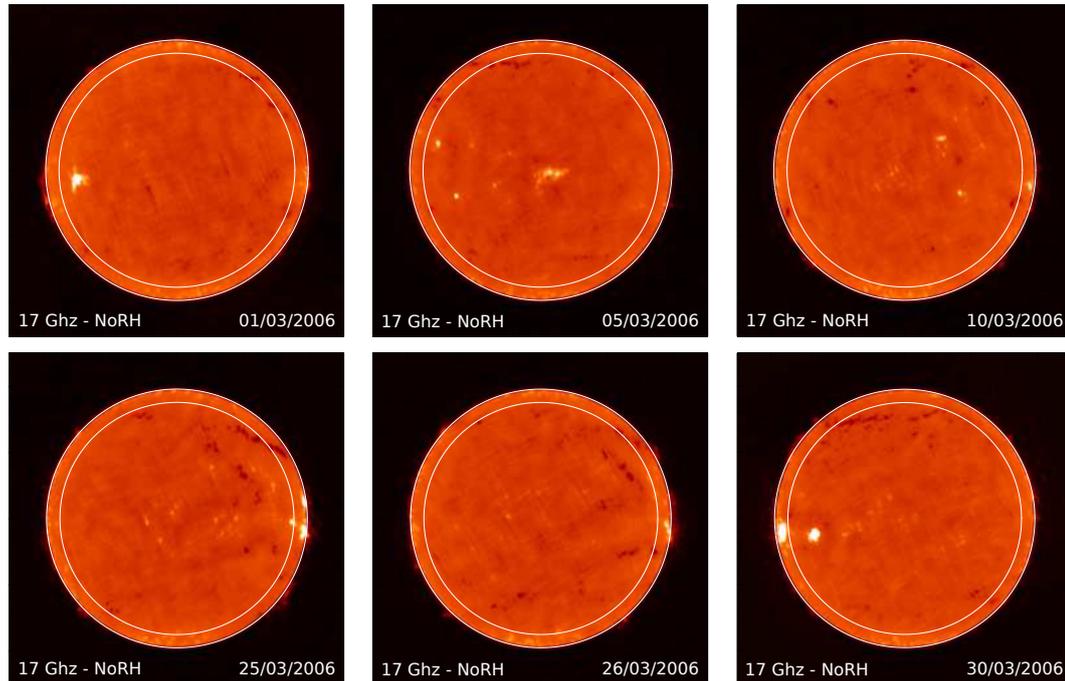
Foi constatado duas regiões de intensidades de brilho médias abaixo do Sol calmo (sc - linha vermelha) no polo norte. Isso ocorreu devido à presença de filamentos (regiões escuras) na superfície solar que aparecem no limbo polar norte, dentro da área dos 100", em alguns mapas do mês 03/2006, conforme exemplificado na Figura 39, e que influenciaram os resultados das médias nessas regiões.

4.2.3 Análise dos mapas em ultravioleta

O estudo das imagens em EUV é feito a partir de maio/2010 até junho/2014. Analisando as regiões coronais a partir das imagens em 171 Å, foi encontrado o perfil de limbo conforme exemplificado na Figura 40, a qual mostra a imagem do dia 15/03/2011 (Figura 40a). Considerando uma região de buraco coronal no polo sul dessa imagem, é possível constatar uma diminuição do brilho até 0,8 sc nessa região, demonstrado no perfil do limbo dessa imagem na Figura 40b.

Outro exemplo em 171 Å é o da Figura 40c, de 09/03 2014, em que são observadas diversas regiões ativas nos limites equatoriais. Dentro do limite de 100" do limbo, pode-se visualizar a intensidade relativa dessa imagem esboçada na Figura 40d, a qual mostra valores

Figura 39 - Filamentos em mapas do Nobeyama em 17 GHz do mês 03/2006.



Fonte: adaptado de NoRH (2014)

de até 20 sc nas regiões ativas e um comportamento ao redor do Sol calmo nas demais regiões do limbo.

Uma análise semelhante foi feita na região de transição, utilizando imagens em 304 Å. Duas imagens são mostrada na Figura 41 a título de exemplo dos resultados encontrados em 304 Å. A Figura 41a mostra a imagem do dia 15/03/20011 com presença de regiões ativas e buracos coronais. A Figura 41b mostra a intensidade relativa do limbo, na qual pode ser observado que o brilho no polo sul foi reduzido a 0,5 sc. Essa região coincide com presença de uma região de buraco coronal já mostrada em 171 Å na Figura 40a.

A outra imagem (09/03/2014) tomada como exemplo é mostrada na Figura 41c, em que são observadas diversas regiões ativas concentradas na região do equador. Dentro do limite de 100" do limbo, pode-se visualizar a intensidade relativa dessa imagem esboçada na Figura 41d, a qual mostra valores de até 12 sc nas regiões ativas e um comportamento próximo ao Sol calmo nas demais regiões do limbo.

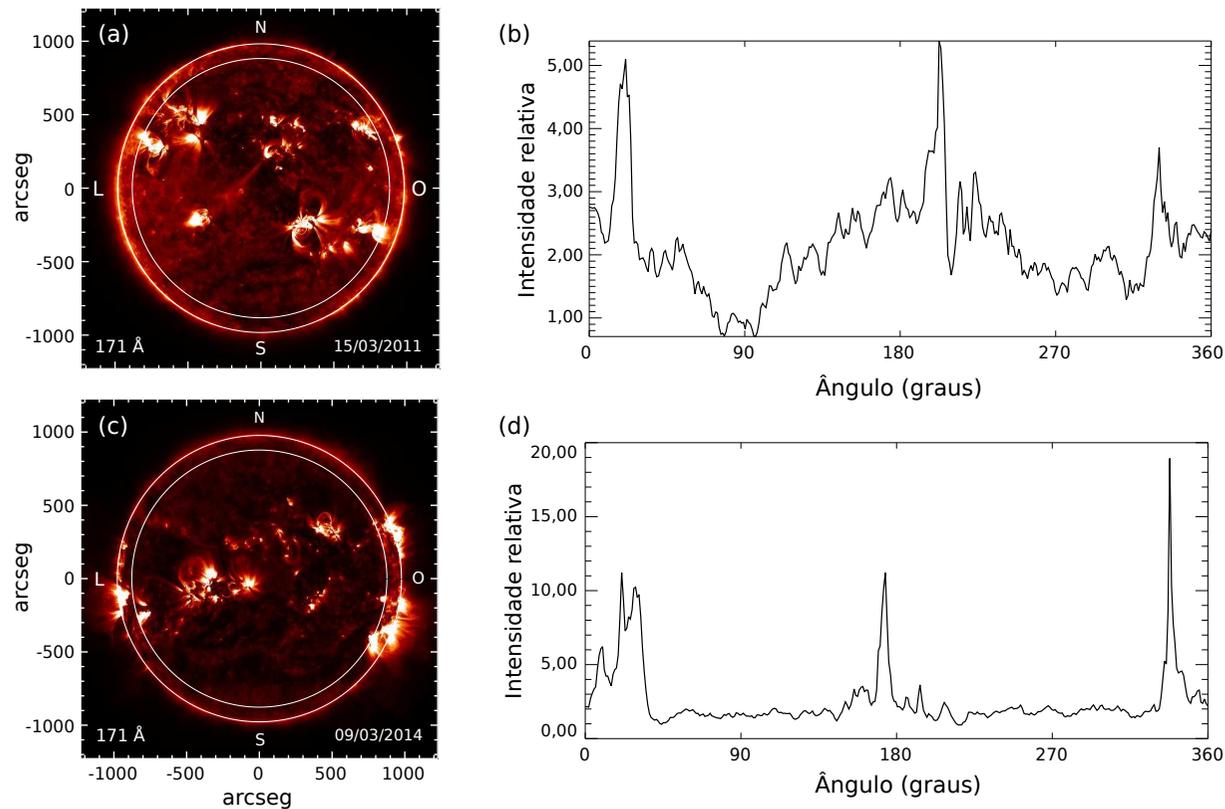
Foram analisadas também as imagens em 1600 Å do período a partir de 2010. Duas imagens são mostrada na Figura 42 a título de exemplo dos resultados encontrados em 1600 Å. A Figura 42a mostra a imagem do dia 15/03/20011. A Figura 42b mostra a intensidade relativa do limbo, na qual se observa uma uniformidade na emissão, excetuando-se as áreas de regiões ativas.

A outra imagem em 1600 Å, de 09/03/2014, tomada como exemplo é mostrada na Figura 42c, em que são observadas diversas regiões ativas concentradas nas regiões de baixas

latitudes. O perfil da intensidade de brilho do limbo da imagem de 09/03/2014 é mostrado na Figura 42d, que apresenta valores acima de 1,8 sc.

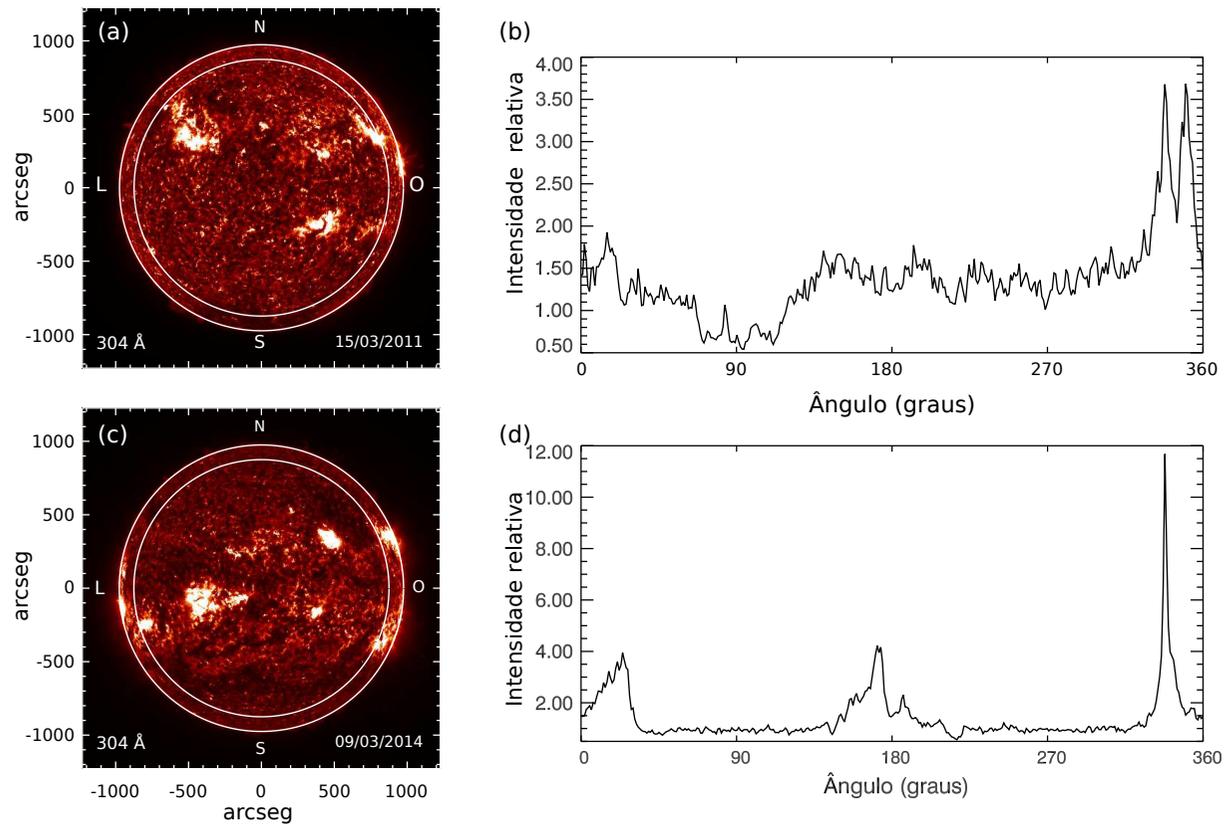
A média da maioria das intensidades de brilho calculadas em 1600 Å estão abaixo de 1,0 sc devido ao obscurecimento de limbo observado neste comprimento de onda, este comportamento é contrário ao observado nos demais comprimentos de onda analisados.

Figura 40 - Exemplo das intensidades relativas em 100" no limbo do Sol em 171 Å (SDO/AIA): a) imagem de 15/03/2011 com a região do limbo delimitada por circunferências em branco que indicam o raio e 100" abaixo dele; b) intensidade relativa do limbo de 15/03/2011, em que observa-se uma diminuição do brilho no polo sul solar; c) imagem de 09/03/2014 com a região entre 100" e o raio delimitada por duas circunferências na cor branca e d) intensidade relativa do limbo em 09/03/2014, em que constata-se regiões ativas em baixas latitudes.



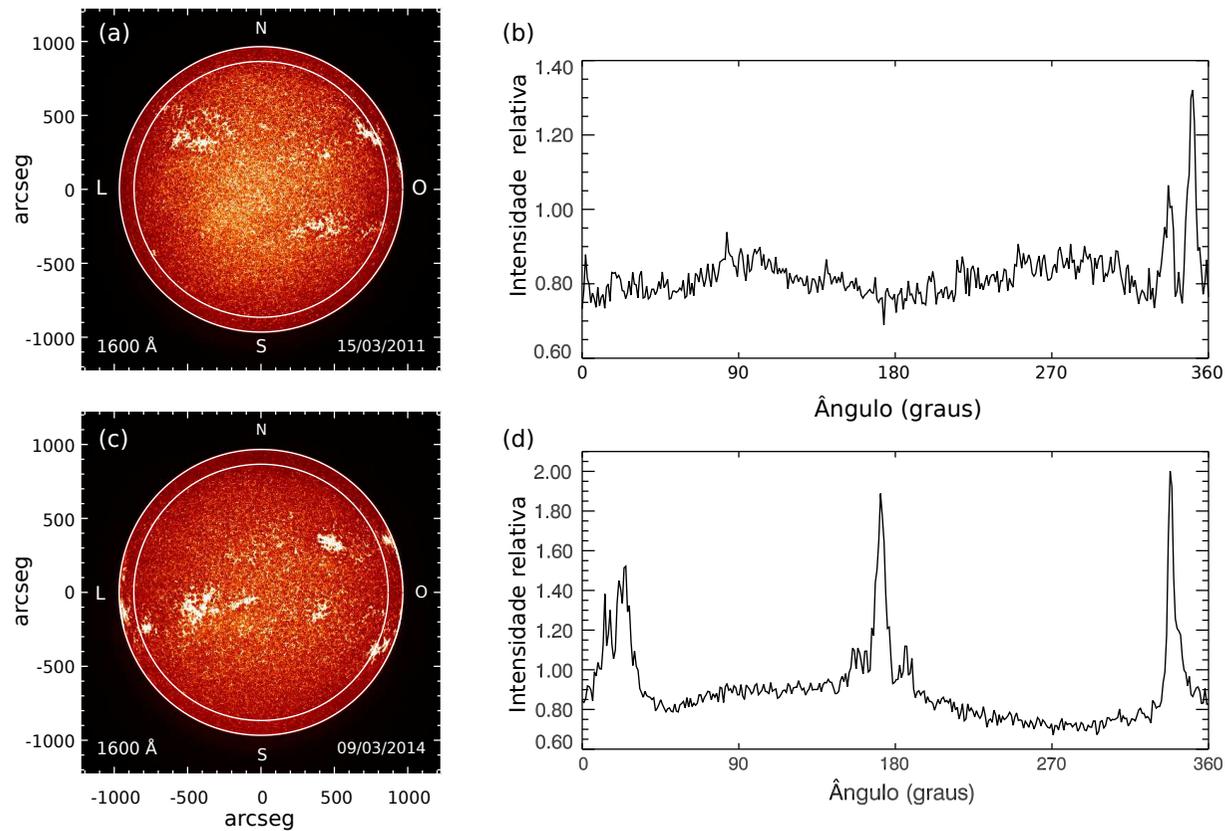
Fonte: o Autor (dados do SDO/AIA (2014))

Figura 41 - Exemplo das intensidades relativas em 100" no limbo do Sol em 304 Å (SDO/AIA): a) imagem de 15/03/2011 com a região do limbo delimitada por circunferências em branco que indicam o raio e 100" abaixo dele; b) intensidade relativa do limbo de 15/03/2011, em que observa-se uma diminuição do brilho no polo sul solar; c) imagem de 09/03/2014 com a região entre 100" e o raio delimitada por duas circunferências na cor branca e d) intensidade relativa do limbo em 09/03/2014, em que constata-se regiões ativas em baixas latitudes chegando a valores acima de 10 sc.



Fonte: o Autor (dados do SDO/AIA (2014))

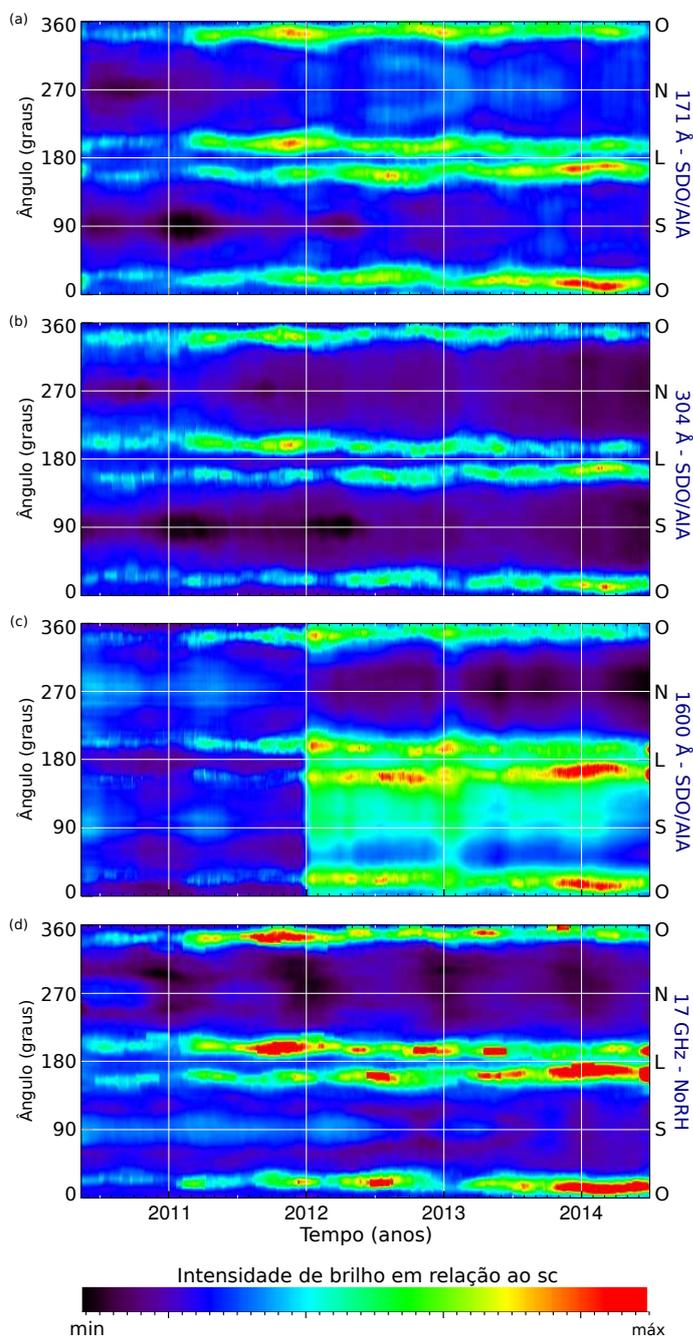
Figura 42 - Exemplo das intensidades relativas em 100" no limbo do Sol em 1600 Å (SDO/AIA): a) imagem de 15/03/2011 com a região do limbo delimitada por circunferências na cor branca que indicam o raio e 100" abaixo dele; b) intensidade relativa do limbo (15/03/2011), em que observa-se uma uniformidade na emissão, exceto nas regiões ativas; c) imagem de 09/03/2014 com a região entre 100" e o raio delimitada por duas circunferências na cor branca e d) intensidade relativa do limbo (09/03/2014), em que verifica-se regiões ativas em baixas latitudes chegando a valores acima de 1.8 sc.



Fonte: o Autor (dados do SDO/AIA (2014))

O resultado de todo o período em EUV associado ao resultado em 17 GHz a partir de 2010 foram sintetizados na Figura 43.

Figura 43 - Mapas sinópticos de limbo a partir de 2010 obtidos em a) 171 Å, b) 304 Å, c) 1600 Å e d) 17 GHz. Foi aplicada uma média corrida a cada 60 pontos no eixo x e 8 pontos no eixo y .



Fonte: o Autor

As observações dos mapas sinópticos podem ter as seguintes considerações:

a) a Figura 43a mostra a evolução temporal em 171 Å, na qual se pode visualizar buracos coronais polares (manchas escuras) em 2010, que vão até 07/2011, sendo mais intensos

no polo sul. O aumento da atividade solar na região do equador é percebida a partir de 06/2011. A partir de 2012 ocorre um aumento de brilho nos polos, observado, principalmente, no norte;

b) a Figura 43b representa a evolução temporal em 304 Å. Ela mostra regiões mais frias nos polos que apresentam menor intensidade no período entre 2010 e 2011 no polo sul e possuem melhor correlação com a posição dos buracos coronais observados em 171 Å. Porém, a partir de meados de 2012 a emissão dos polos é visivelmente reduzida, mostrando um comportamento contrário ao observado em 171 Å;

c) a análise em 1600 Å, mostrada na Figura 43c, exibe um maior abrilhantamento nos polos até 07/2011 (maior no polo norte), onde começa a se intensificar o ciclo de manchas na região equatorial e

d) a Figura 43d mostra o abrilhantamento no limbo do Sol em 17 GHz. As regiões brilhantes nos polos (manchas claras) estão presentes em 2010 e, no polo sul, se estendem até 06/2012. Estas regiões brilhantes apresentam maior correlação de posição com os buracos coronais observados em 171 Å e 304 Å do que com as regiões brilhantes observadas nos polos em 1600 Å.

Para melhor comparar a distribuição angular do brilho entre as emissões estudadas, foi feita uma média dos resultados obtidos para cada ângulo durante o mês de julho/2010. O resultado, apresentado na Figura 44, mostra que a extensão angular das regiões de grande aumento de brilho polar em 17 GHz, delimitadas pelas linhas azuis, são compatíveis com as dos buracos coronais em ambos os polos. Ao redor do polo norte, ocorrem intensidades médias menores que 1 sc, devido à presença de filamentos próximos ao limbo.

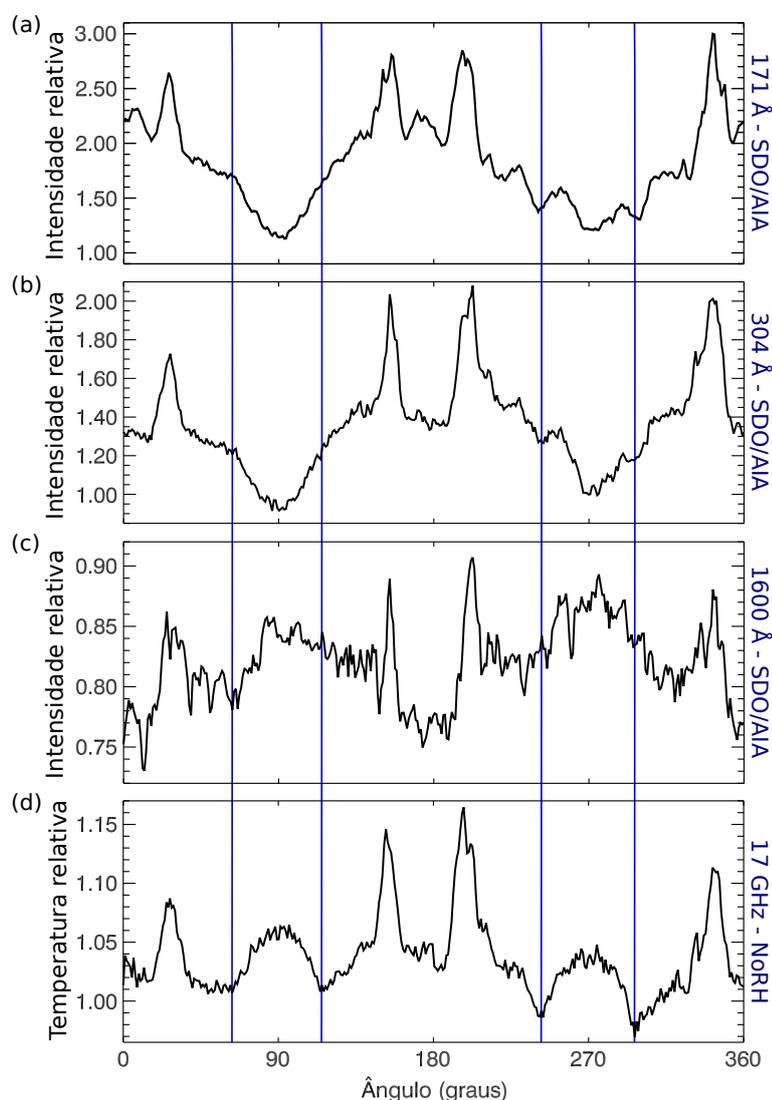
A intensidade do brilho 17 GHz atinge valores próximos a 6,5% e de até 4,5% acima do Sol calmo nos polos sul e norte, respectivamente, enquanto que em 1600 Å, o aumento da intensidade de emissão é de 6% para o polo sul e 9% para o polo norte acima de 0,8 sc, apesar de se estender até a latitudes mais baixas.

Entretanto, as emissões em 171 Å atingem valores de 60% abaixo dos níveis de onde não existem buracos coronais e a intensidade de brilho em 304 Å apresenta também uma queda de 40% no polo sul e de até 35% no polo norte.

A maior redução de intensidade observada em 171 Å, deve-se ao fato de a linha ser opticamente fina e gerada à temperaturas coronais, o que resulta em um grande aumento de brilho nas proximidades do limbo, de até 3 vezes o nível do Sol calmo (Figura 4.1.2.1) e, a presença de buracos coronais, reduz este abrilhantamento para valores menores que o nível do Sol calmo. Por outro lado, em 304 Å, praticamente não se observa abrilhantamento no limbo, o que resulta em uma menor redução no brilho médio quando buracos coronais estão presentes.

São nos períodos de mínimo que existe maior ocorrência de buracos coronais nos polos (CRANMER, 2009) e que o brilho polar em rádio se mostra mais intenso (SELHORST *et al.*, 2003). A comparação entre os mapas sinópticos sugere que, assim como observado em regiões equatoriais, a presença de buracos coronais resulta em aumento de temperatura de brilho em 17 GHz. Pode-se notar também que na ausência de buracos coronais as emissões em 17 GHz e

Figura 44 - Média no mês 07/2010 da intensidade de brilho do limbo solar em EUV e em 17 GHz. As linhas azuis delimitam o abrilhantamento nos polos em 17 GHz.



Fonte: o Autor

304 Å seguem comportamento similar e apresentam redução em suas intensidades, enquanto o comportamento da emissão em 171 Å é oposta. Isso pode indicar que nestas condições (ausência de buracos coronais) as emissões em 17 GHz e 304 Å sejam geradas pelas mesmas estruturas solares e na mesma região da atmosfera. Os estudos desse trabalho mostram que existe uma correlação entre as regiões de buracos coronais e o aumento do brilho em 17 GHz.

A análise do mapa sinóptico obtido no comprimento de onda de 1600 Å mostra que este segue a mesma tendência das emissões em rádio, conseqüentemente, está anticorrelacionado com a emissão em 171 Å. Isso é esperado pois, formado na faixa do contínuo e com íons de C IV, ele é emitido em regiões da alta fotosfera e é compatível com a região de formação das emissões em rádio. Nota-se, porém, que a distribuição angular do brilho em 1600 Å e em 17 GHz não é a mesma e, que enquanto o aumento de brilho foi maior no polo norte em 1600 Å,

em 17 GHz o polo sul foi que apresentou o maior aumento de brilho.

Já as medidas em 171 Å, que mostram emissões em alturas coronais, apresentaram um comportamento que segue o ciclo de atividade solar, ou seja, evoluem da mesma forma que o número de manchas solares e são menos intensas no período de mínimo solar.

Entre todos os comprimentos de onda é notável que as regiões ativas estão bem correlacionadas, pois apresentam o mesmo perfil nas respectivas regiões onde aparecem.

4.2.4 Comparação entre o brilho médio obtido em 17 GHz e EUV

Com base nos mapas sinópticos obtidos anteriormente, foi feita uma análise do brilho médio do limbo equatorial calculada a partir das matrizes sinópticas de limbo mostradas na Figura 43, com a finalidade de melhor analisar as diferenças e similaridades entre a emissão observada no limbo em 17 GHz e as linhas EUV estudadas. A região equatorial foi delimitada entre -45° e $+45^\circ$ de latitude, e calculada a emissão média para cada um dos comprimentos de onda estudados.

Na Figura 45a, comparou-se a relação entre os valores obtidos em 17 GHz (eixo x) e 171 Å (eixo y), os pontos azuis representam os valores obtidos no limbo oeste, enquanto os pretos foram obtidos no limbo leste. Supondo, que não haja diferenças entre os valores obtidos no leste e no oeste, foi feito um ajuste linear aos dados, dado por:

$$f(x) = a + bx \quad (3)$$

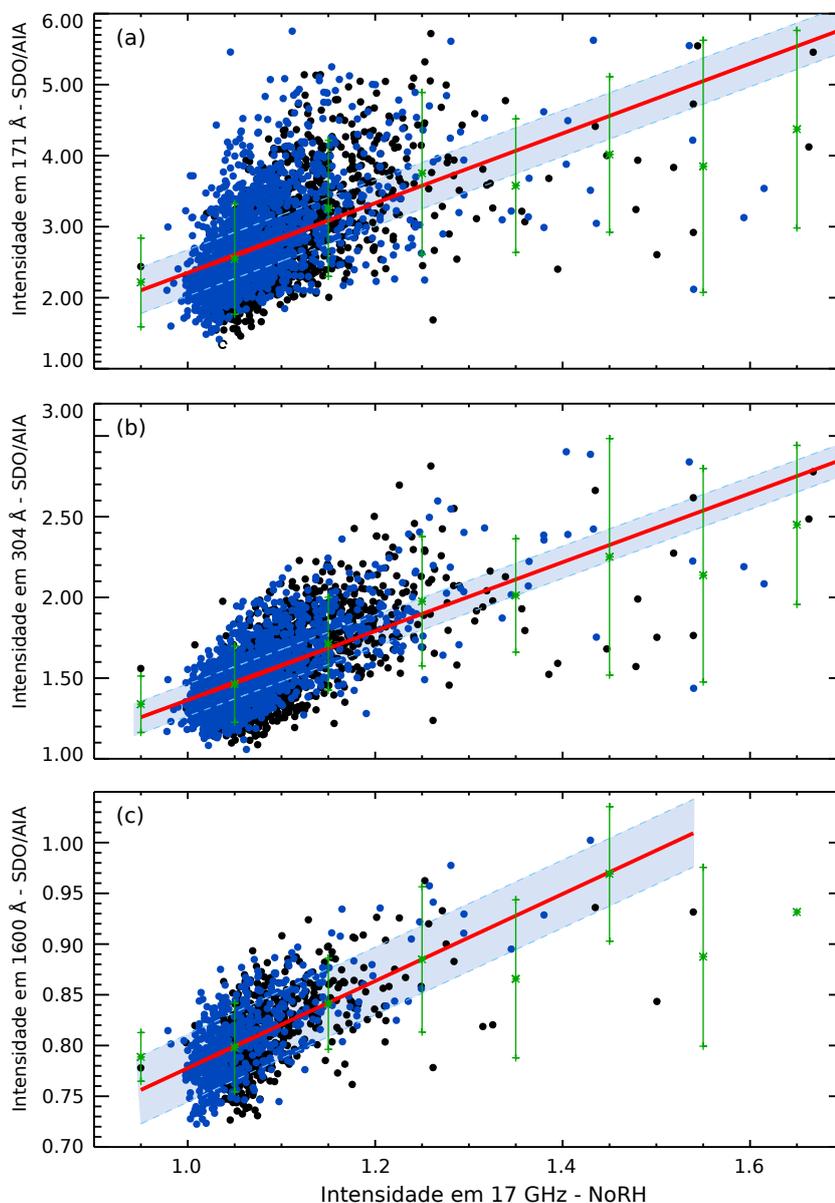
Entre 17 GHz e 171 Å, o ajuste resultou em $a = -2,56 \pm 0,16$ e $b = 4,91 \pm 0,15$. O ajuste é mostrado pela linha vermelha da figura, enquanto que a região azul, limitada entre as linhas tracejadas, representa 2σ em relação à variável a . As linhas verticais em verde são as taxas de dispersão. As retas dos ajustes dispõem de um coeficiente angular positivo ($b > 0$), isso significa que à medida que as intensidade em 17 GHz aumentam, as intensidades em EUV também aumentam.

A mesma análise foi feita comparando os valores médios obtidos no equador em 17 GHz com os obtidos em 304 Å (Figura 45b) onde foi encontrado o valor de $a = -0,77 \pm 0,05$ e $b = 2,13 \pm 0,04$. Como na comparação anterior, o ajuste linear é mostrado pela linha vermelha, a região azul representa 2σ em relação à variável a e as linhas verticais verdes são as taxas de dispersão.

O ajuste entre 17 GHz e 1600 Å (Figura 45c) resultou em $a = 0,35 \pm 0,02$ e $b = 0,43 \pm 0,02$. Da mesma forma, a linha vermelha representa o ajuste encontrado, a região azul representa 2σ em relação à variável a e as linhas verticais verdes são as taxas de dispersão.

Como esperado a emissão equatorial observada em 17 GHz está bem correlacionada com os valores observados nas linhas do EUV, com todos os índices de correlação acima de

Figura 45 - Comparação da intensidade relativa entre 17 GHz e 171 Å, 304 Å, 1600 Å em $\pm 45^\circ$ do equador. A reta vermelha indica o ajuste linear dos pontos, a região azul indica o desvio padrão do ajuste e as linhas verdes indicam a taxa de dispersão.



Fonte: o Autor

0,50 (Tabela 2). Isso se explica pelo fato da emissão observada no equador solar ser proveniente, principalmente, de regiões ativas.

Observa-se uma maior dispersão na relação entre as medidas em 171 Å e em 17 GHz, o que pode ser explicado pelo fato da emissão em 171 Å ser gerada por temperaturas coronais e onde a densidade de partículas é muito baixa e pouco contribuem para a emissão das regiões ativas em 17 GHz, visto que a grande maioria delas tem como principal mecanismo de emissão o bremsstrahlung (SELHORST *et al.*, 2014), o qual depende principalmente da densidade eletrônica ($T_b \sim n^2 \cdot T^{-\frac{1}{2}}$).

Tabela 2 - Tabela de índices de correlação entre os valores diários das médias angulares obtidos no limbo solar em 17 GHz e nas linhas de EUV

	17 GHz		
	Equador	Polo sul	Polo norte
171 Å	0,52	-0,27	-0,20
304 Å	0,65	-0,21	-0,70
1600 Å	0,62	0,24	0,39

Fonte: o Autor

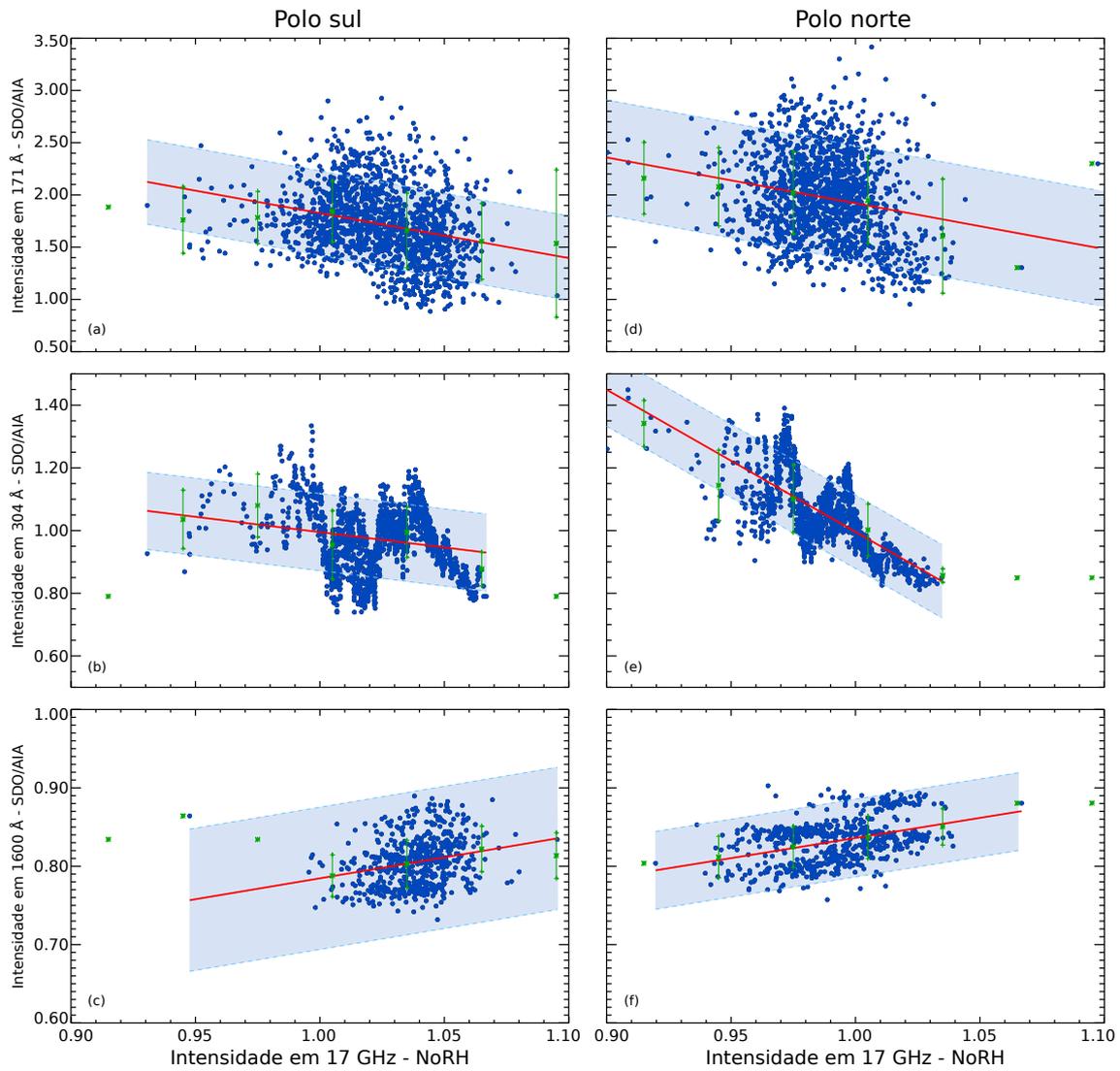
A Figura 46 mostra a comparação da intensidade relativa entre 17 GHz e os comprimentos de onda em EUV nas regiões polares. Os gráficos foram elaborados em $\pm 30^\circ$ em torno de cada polo. A reta vermelha indica o ajuste linear dos pontos, a região azul indica o desvio padrão do ajuste e as linhas verdes indicam a taxa de dispersão. Os pontos mostram comportamentos distintos em cada comprimento de onda em EUV analisado. Em 171 Å e 304 Å as retas dos ajustes dispõem de coeficientes angulares negativos ($b < 0$) nos dois polos, isso significa que à medida que as intensidades em 17 GHz aumentam, as intensidades em EUV diminuem. Em 1600 Å as retas dos ajustes dispõem de coeficientes angulares positivos ($b > 0$) para ambos os polos, similar ao comportamento na região equatorial.

Como já pode ser observado nos mapas sinópticos mostrados na Figura 43, o comportamento dos polos do Sol difere bastante das observações em 17 GHz e nas linhas de EUV. Apesar disso, tentou-se através dos testes de correlação verificar um único padrão para as relações entre as emissões polares em 17 GHz em comparação com as medidas em EUV. Constatou-se uma anticorrelação entre os dados em 17 GHz e 171 Å com índices próximos, -0,27 para o polo sul e -0,20 para o polo norte.

Por outro lado, a comparação entre 17 GHz e 1600 Å mostrou correlações positivas de 0,24 e 0,39, respectivamente, para os polos sul e norte. Há de se notar que, neste caso, foram usados apenas os dados obtidos até dezembro de 2011. Este resultado mostra que os dois comprimentos de onda recebem contribuições das mesmas estruturas solares presentes na alta fotosfera e cromosfera, como por exemplo, fáculas.

A análise entre 17 GHz e 304 Å mostrou o resultado mais discrepante na comparação entre os polos, apresentando índice de correlação de -0,21 para o sul e -0,70 para o norte. Este resultado pode ser decorrente do diferente comportamento que a emissão em 304 Å apresenta na presença ou ausência de buracos coronais.

Figura 46 - Comparação da intensidade relativa entre 17 GHz e 171 Å, 304 Å, 1600 Å em $\pm 30^\circ$ dos polos. A reta vermelha indica o ajuste linear dos pontos, a região azul indica o desvio padrão do ajuste e as linhas verdes indicam a taxa de dispersão.



Fonte: o Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou estudar o comportamento do abrilhantamento nos polos do Sol em rádio e em extremo ultravioleta, com o propósito precípua de analisar as transformações deste brilho, principalmente durante os períodos de mínimo do ciclo da atividade solar. Essa investigação teve como incitação trabalhos anteriores que mostraram correlação do abrilhantamento de limbo polar em rádio (17 GHz) com o ciclo das fáculas polares (SELHORST *et al.*, 2003) e com a variação do campo magnético polar (RIEHOKAINEN *et al.*, 2001). Outrossim, Janardhan *et al.* (2010), Wang *et al.* (2009) verificaram a redução da intensidade dos campos magnéticos do Sol e Sheeley Jr. (2008) constataram uma redução significativa do número de fáculas polares desde 1986, e que essas são bem correlacionadas com as linhas de campo magnético polar. E, ainda, recentemente, foi mostrado que este abrilhantamento de limbo reduziu sua intensidade média seguindo a redução magnética polar observada (SELHORST *et al.*, 2011; GOPALSWAMY *et al.*, 2012; NITTA *et al.*, 2014).

Nitta *et al.* (2014) sugeriram que as fontes compactas, que caracterizam o abrilhantamento em 17 GHz, fossem artefatos gerados pelo método de construção dos mapas, pois tais fontes não apresentavam correlação individual com as estruturas em EUV. Por outro lado, Selhorst *et al.* (2010) atribuíram a falta de correlação individual entre tais fontes compactas, às diferenças intrínsecas a cada tipo de emissão. Seguindo o método sugerido por Nitta *et al.* (2014) aos mapas em 17 GHz foi verificado que a contribuição das fontes quentes ($>1,2$ sc) polares ao brilho polar médio foi reduzida significativamente durante o ciclo atual, sugerindo que as fontes compactas observadas nos polos em 17 GHz são reais, pois se fossem gerados artificialmente de forma aleatória, deveriam distribuir-se igualmente ao longo dos anos.

Apesar das estruturas compactas observadas em 17 GHz não mostrarem correlação um para um com as observadas em EUV (NITTA *et al.*, 2014), a comparação entre as emissões polares médias mostraram que as medidas em 304 \AA seguem o mesmo comportamento de 17 GHz, ou seja, mostram redução no brilho médio polar com o aumento da atividade solar, enquanto que em 171 \AA o comportamento é oposto, o que corrobora os resultados obtidos por Selhorst *et al.* (2010). Outrossim, verificou-se que a emissão quiescente em EUV da alta fotosfera (1600 \AA) segue o mesmo comportamento médio observado em 17 GHz.

O segundo estudo foi feito elaborando mapas sinópticos de uma área de $100''$ ao redor do limbo solar. Foram calculadas médias das intensidades relativas do limbo solar, para os mapas em rádio e as imagens em EUV. Essas médias foram feitas a cada grau do limbo solar, delimitados entre o raio e a $100''$ abaixo dele.

A análise em 17 GHz (Figura 37) mostrou esse abrilhantamento mais intenso nos períodos de mínimo do ciclo solar entre 1993 e 1998 em relação ao mínimo seguinte, entre 2004 e 2011. Fazendo uma comparação entre os polos, pode-se notar que o polo sul é mais intenso que o polo norte em todo o período analisado. Mesmo com intensidade menor, o polo norte iniciou o aumento de brilho aproximadamente um ano antes do polo sul (2002), concordando com tra-

balhos anteriores que usavam métodos diferentes (SELHORST *et al.*, 2011; GOPALSWAMY *et al.*, 2012; NITTA *et al.*, 2014).

Na comparação entre rádio e EUV, as características do perfil do limbo das imagens estudadas mostram uma intensidade maior nas emissões oriundas das regiões equatoriais, devido à presença de regiões ativas. Já, nas regiões polares, o brilho segue características distintas em cada comprimento de onda.

Comparando o mapa sinóptico em 17 GHz com os mapas analisados em EUV (Figura 43), verificou-se que essas intensidades de brilho correspondem aos locais onde há presença de buracos coronais em 171 Å, e se desfazem gradualmente e ao mesmo tempo. Aumento do brilho em 17 GHz relacionados à presença de buracos coronais em baixas latitudes foram reportados anteriormente por Gopalswamy *et al.* (1999) e Maksimov *et al.* (2006). Este aumento de brilho em 17 GHz pode não estar relacionado somente às mudanças no plasma coronal, como também à presença de estruturas cromosféricas que surgem ao redor das linhas de campo magnético localmente abertas que delimitam os buracos coronais (SELHORST *et al.*, 2010).

Nas mesmas regiões em 304 Å verificou-se o registro de buracos coronais quando estes, em 171 Å, são mais intensos e, uma combinação de emissões dos buracos coronais e da radiação proveniente de diferentes estruturas de regiões mais baixas da atmosfera solar.

As emissões observadas em 1600 Å possuem características similares às observadas em 17 GHz, ou seja, possuem comportamento oposto ao do ciclo solar, porém não se relacionam fielmente em se tratando de localização das mesmas.

A partir das observações dos comprimentos de onda estudados nos mapas sinópticos, pode ser estabelecida uma relação entre a redução da intensidade de emissão em 171 Å e o aumento do brilho em 17 GHz, bem como com o aumento do brilho em 1600 Å, mesmo que em proporções distintas. Quanto às emissões em 304 Å, elas se mostram influenciadas tanto pelas emissões da coroa quanto por estruturas inferiores da atmosfera solar.

Os estudos realizados neste trabalho apresentaram coerência entre si e entre estudos de autores anteriores que incitaram a sua realização. Em ambas as metodologias foi detectada uma variação temporal similar entre os comprimentos de onda em EUV analisados (304 Å e 1600Å), que emitem em regiões abaixo da coroa, e as emissões em 17 GHz que possuem altitudes e temperaturas compatíveis entre si. Porém, em 171 Å, que emite em regiões da coroa com uma temperatura bem superior, foi demonstrado um procedimento contrário aos demais comprimentos de onda averiguados mas, similar ao ciclo solar.

REFERÊNCIAS

- ADDISON WESLEY. **Pearson Education Inc.** 2007. Disponível em: <<http://cse.ssl.berkeley.edu/bmendez/ay10/2002/notes/lec12.html>>. Acesso em: 10/10/2014. 21
- BASU, S.; ANTIA, H. M. Changes in Solar Dynamics from 1995 to 2002. **ApJ**, v. 585, p. 553–565, mar. 2003. 15
- CHARBONNEAU, P. *et al.* Helioseismic Constraints on the Structure of the Solar Tachocline. **ApJ**, v. 527, p. 445–460, dez. 1999. 15
- CLIVER, E. W.; KEER, N. C. Richard Christopher Carrington: Briefly Among the Great Scientists of His Time. **Sol. Phys.**, v. 280, p. 1–31, set. 2012. 22
- COSTA, J. E. R. *et al.* Solar Radius Variations at 48 GHZ Correlated with Solar Irradiance. **ApJ**, v. 520, p. L63–L66, jul. 1999. 34
- CRANMER, S. R. Coronal Holes. In: **Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics**. [S.l.: s.n.], 2001. (Nature Publishing Group). 24
- CRANMER, S. R. C. Coronal holes. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 6, n. 3, 2009. Disponível em: <<http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-3>>. Acesso em: 07/06/2014. 24, 25, 45, 61
- EFANOV, V. A. *et al.* Radio emission of the solar polar regions at millimeter wavelengths. In: Kundu, M. R.; Gergely, T. E. (Ed.). **Radio Physics of the Sun**. [S.l.: s.n.], 1980. (IAU Symposium, v. 86), p. 141–144. 26
- EVREN, S. Facular structures on cool stars. **Turkish Journal of Physics**, v. 23, p. 383–390, fev. 1999. 24
- GIMÉNEZ DE CASTRO, C. G. *et al.* The solar radius in the EUV during the cycle XXIII. **A&A**, v. 476, p. 369–372, dez. 2007. 41, 42
- GOPALSWAMY, N. *et al.* Microwave enhancement and variability in the elephant’s trunk coronal hole: Comparison with SOHO observations. **J. Geophys. Res.**, v. 104, p. 9767–9780, maio 1999. 27, 68
- _____. Behavior of Solar Cycles 23 and 24 Revealed by Microwave Observations. **ApJ**, v. 750, p. L42, maio 2012. 27, 67, 68
- HABBAL, S. R. *et al.* The Curious Case of the Fe XI 789.2 nm Line. In: AAS/SOLAR PHYSICS DIVISION MEETING, 40., 2009. [S.l.], **Meeting ...[S.l.: s.n.]**. 2009. p. 32.04. 19
- HALE, G. E. On the Probable Existence of a Magnetic Field in Sun-Spots. **ApJ**, v. 28, p. 315, nov. 1908. 20
- HANSLMEIER, A. **The Sun and Space Weather**. Springer, 2007. (Astrophysics and Space Science Library). Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=MKJJzY6BDNIC>>. Acesso em: 05/11/2014. 22
- HATHAWAY, D. H. **NASA: Solar Physics. Marshall Space Flight Center**. 2014. Disponível

- em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov>>. Acesso em: 14/10/2014. 14, 15, 16, 18, 19, 23, 24, 39
- JANARDHAN, P.; BISOI, S. K.; GOSAIN, S. Solar Polar Fields During Cycles 21 - 23: Correlation with Meridional Flows. **Sol. Phys.**, v. 267, p. 267–277, dez. 2010. 22, 67
- JANSSENS, J.; DUBOIS, F. **Franky Dubois' Sun Page [online]**. 2014. Disponível em: <<http://www.digilife.be/club/franky.dubois/join%20us.htm>>. Acesso em: 17/10/2014. 25
- KELVINSONG. **Wikimedia Commons. Diagram of the Sun**. 2012. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sun_poster.svg>. Acesso em: 29/04/2014. 15
- KRISSINEL, B. B. *et al.* Some Features of Manifestations of Coronal Holes in Microwave Emission. **PASJ**, v. 52, p. 909–917, out. 2000. 27
- KUTNER, M. **Astronomy: A Physical Perspective**. Cambridge University Press, 2003. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=2QVmiMW000MC>>. Acesso em: 28/10/2014. 17, 18, 19
- LANG, K. R. **Sun, Earth and Sky**. [S.l.: s.n.], 1997. 20
- LEMEN, J. R. *et al.* The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). **Sol. Phys.**, v. 275, p. 17–40, jan. 2012. 30, 31
- LUC VIATOUR. **Wikimedia Commons. Total Solar eclipse 1999 in France**. 1999. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_eclips_1999_5.jpg>. Acesso em: 27/01/2015. 18
- MAKSIMOV, V. P. *et al.* On the Relation of Brightness Temperatures in Coronal Holes at 5.7 and 17 GHz. **PASJ**, v. 58, p. 1–10, fev. 2006. 27, 68
- MALAGOLI, A. **Views of the Solar System: Sun**. 2013. Disponível em: <<http://solarviews.com/cap/misc/convect3.htm>>. Acesso em: 10/10/2014. 16
- MIESCH, M. S. Large-scale dynamics of the convection zone and tachocline. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 2, n. 1, 2005. Disponível em: <<http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-1>>. Acesso em: 05/11/2014. 15, 20
- _____. The solar dynamo. **Royal Society of London Philosophical Transactions Series A**, v. 370, p. 3049–3069, jul. 2012. 20
- MOLDWIN, M. **An Introduction to Space Weather**. Cambridge University Press, 2008. Disponível em: <<http://www.cambridge.org/9780521861496>>. Acesso em: 29/05/2014. 14
- NAKAJIMA, H. *et al.* The Nobeyama radioheliograph. **IEEE Proceedings**, v. 82, p. 705–713, maio 1994. 29
- NINDOS, A. *et al.* Microwave and Extreme Ultraviolet Observations of Solar Polar Regions. **ApJ**, v. 527, p. 415–425, dez. 1999. 26
- NITTA, N. V. *et al.* Solar Cycle Variations of the Radio Brightness of the Solar Polar Regions as Observed by the Nobeyama Radioheliograph. **ApJ**, v. 780, p. L23, jan. 2014. 27, 33, 38, 67, 68

- NORH. **Nobeyama Radioheliograph**. 2014. Disponível em: <<http://solar.nro.nao.ac.jp/norh/>>. Acesso em: 28/01/2015. 23, 29, 30, 33, 36, 37, 42, 44, 45, 52, 55
- OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 3. ed. São Paulo, Brasil: Editora Livraria da Física, 2014. 14, 17, 22
- PESNELL, W. D. **SDO Solar Dynamics Observatory**. 2014. Disponível em: <<http://sdo.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 05/11/2014. 22, 32
- RIEHOKAINEN, A. *et al.* Millimeter-radio, SOHO/EIT 171 Å features and the polar faculae in the polar zones of the Sun. **A&A**, v. 366, p. 676–685, fev. 2001. 26, 67
- SCHWABE, M. Die Sonne. Von Herrn Hofrath Schwabe. **Astronomische Nachrichten**, v. 20, p. 283, mar. 1843. 20
- SDO/AIA. **SDO Solar Dynamics Observatory[online]**. 2014. Disponível em: <<http://sdo.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 27/01/2015. 18, 23, 25, 31, 32, 51, 54, 57, 58, 59
- SDO/HMI. **SDO Solar Dynamics Observatory[online]**. 2014. Disponível em: <<http://sdo.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 16/05/2014. 23
- SEAL, A.; SEAL, C. **Anthony and Christopher Seal's Astronomy Web Site [online]**. 2003. Disponível em: <<http://www.acseal.freeserve.co.uk/solar.htm>>. Acesso em: 09/06/2014. 24, 25
- SELHORST, C. L. **Modelo de atmosfera solar com inclusão de espículas aplicado às observações em rádio frequências**. São José dos Campos, 129 f, 2003. Dissertação (Mestrado) — INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 26
- SELHORST, C. L. *et al.* The 17 GHz Active Region Number. **ApJ**, v. 790, p. 134, ago. 2014. 64
- _____. How are the EUV and radio polar limb-brightenings correlated? **A&A**, v. 509, p. A51, jan. 2010. 27, 30, 45, 48, 67, 68
- _____. The Behavior of the 17 GHz Solar Radius and Limb Brightening in the Spotless Minimum XXIII/XXIV. **ApJ**, v. 734, p. 64, jun. 2011. 27, 34, 35, 67, 68
- SELHORST, C. L.; SILVA, A. V. R.; COSTA, J. E. R. Radius variations over a solar cycle. **A&A**, v. 420, p. 1117–1121, jun. 2004. 29
- _____. Solar atmospheric model with spicules applied to radio observation. **A&A**, v. 433, p. 365–374, abr. 2005. 30, 50
- SELHORST, C. L. *et al.* Temporal and angular variation of the solar limb brightening at 17 GHz. **A&A**, v. 401, p. 1143–1150, abr. 2003. 27, 29, 37, 61, 67
- SHEELEY JR., N. R. Polar Faculae during the Sunspot Cycle. **ApJ**, v. 140, p. 731, ago. 1964. 25
- _____. Polar faculae during the interval 1906–1975. **J. Geophys. Res.**, v. 81, p. 3462–3464, jul.

1976. 25

_____. Polar faculae - 1906-1990. **ApJ**, v. 374, p. 386–389, jun. 1991. 25

_____. A Century of Polar Faculae Variations. **ApJ**, v. 680, p. 1553–1559, jun. 2008. 25, 67

SHIBASAKI, K. Radio Synoptic Maps and Polar CAP Brightening. In: ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC CONFERENCE SERIES, 140., 1998. [S.l.], **Anais...** [S.l.: s.n.], 1998. p. 373. 26, 37

SILVA, A. V. R. d. **Nossa Estrela: o Sol**. São Paulo, Brasil: Editora Livraria da Física, 2006. 19, 21, 22

SOLAR SYSTEM SCOPE. **Solar System Scope**. 2014. Disponível em:
<http://www.solarsystemsscope.com/nexus/resources/planet_images/>. Acesso em:
24/10/2014. 20

STIX, M. Sunspots: What is interesting? **Astronomische Nachrichten**, v. 323, p. 178–185, jul. 2002. 22

_____. **The sun : an introduction**. [S.l.: s.n.], 2004. 17

TAKANO, T. *et al.* An Upgrade of Nobeyama Radioheliograph to a Dual-Frequency (17 and 34 GHz) System. In: CORONAL PHYSICS FROM RADIO AND SPACE OBSERVATIONS, 483., 1997. Berlin, **Anais ...** Berlin: Springer Verlag, 1997, p. 183. 29, 30

WANG, Y.-M.; ROBBRECHT, E.; SHEELEY JR., N. R. On the Weakening of the Polar Magnetic Fields during Solar Cycle 23. **ApJ**, v. 707, p. 1372–1386, dez. 2009. 21, 67

ZIRIN, H. **The Astrophysics of the Sun**. [S.l.: s.n.], 1998. 17