

O NÚMERO DE MANCHAS SOLARES: ÍNDICE DA ATIVIDADE DO SOL MEDIDO NOS ÚLTIMOS 50 ANOS^(*)

J. C. Penereiro^{1a,b, 2, 3}, L. Parra^{1a}, R. C. Pellegrini^{1b} e W.J. Maluf³

(*) em memória de Jean Nicolini

I. INTRODUÇÃO

O Sol é uma estrela de tipo espectral G2 e de classe de luminosidade V. Ele é considerado como uma estrela do tipo anã que está na seqüência principal do diagrama de Hertzsprung-Russell, portanto se trata de uma estrela muito comum no universo. A relevância em estudá-la está no fato que está muito próxima de nós e, desta forma, podemos observá-la e medi-la com maior precisão do que qualquer outra estrela. Como toda estrela, o Sol é uma imensa esfera constituída por um plasma (gás ionizado superaquecido) com temperatura de cerca de 5700 K na superfície (fotosfera) e da ordem de $12,7 \times 10^6$ K no núcleo.

A maior parte da informação que nos chega provem da superfície solar, que é cerca de um milésimo do raio do Sol ($6,96 \times 10^8$ m), e compreende a fotosfera, a cromosfera e coroa inferior; o que poderíamos chamar de “a pele do Sol”. Somente esta pequena parte, a mais externa do Sol, é capaz de enviarnos a radiação eletromagnética que não terá interação com mais nada. Portanto, essa radiação contém informações sobre quais são as condições físicas, tais como: pressão, temperatura e a densidade da região que a emitiu, isto é, a superfície solar.

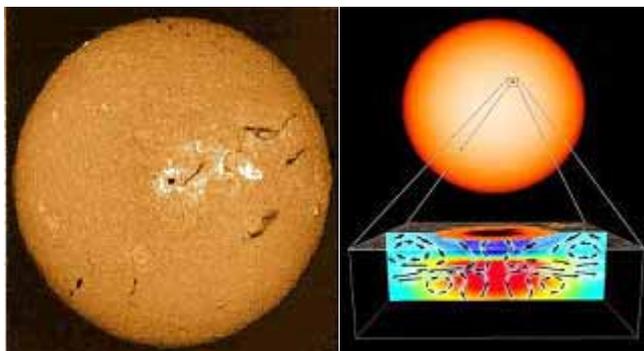


Fig.-1. (direita) Imagem do Sol na linha H_{α} do espectro mostrando filamentos escuros, proeminências, manchas e granulações (crédito: National Solar Observatory - USA). (esquerda) Concepção artística dos gases moviementando-se sob uma mancha solar (crédito: NASA).

A fotosfera, observada com grande resolução espacial e com boas condições atmosféricas, se parece como uma rede, a qual denomina-se granulação solar (Figura 1), a qual podemos associa-la a parte mais

alta da zona de convecção. Com efeito, num modelo estelar para o Sol, deve-se levar em conta que as forças de pressão do plasma solar e a força de gravidade desse mesmo plasma devem estar em equilíbrio. Assim, ao integrar as equações da teoria da evolução estelar para uma estrela do tipo solar, se obtém uma estrutura em três camadas. No centro se encontra um núcleo onde se produz toda a energia através das reações de fusão nuclear. Esta é transportada via uma ampla zona radiativa, que assim é denominada porque os fótons gerados no núcleo são transportados por radiação, isso é, por emissão e absorção por parte dos átomos presentes. A partir de um certo nível a convecção é mais eficiente no transporte de energia que a radiação e, assim, começa a zona convectiva que se estende até a superfície onde é possível observá-la [11 e 12].

O Sol tem um período de revolução de cerca de 26 dias terrestres e não gira como um sólido rígido. Ele apresenta uma rotação diferencial, o que implica em dizer que o equador solar gira mais rapidamente que as regiões próximas aos pólos (Fig.-2).

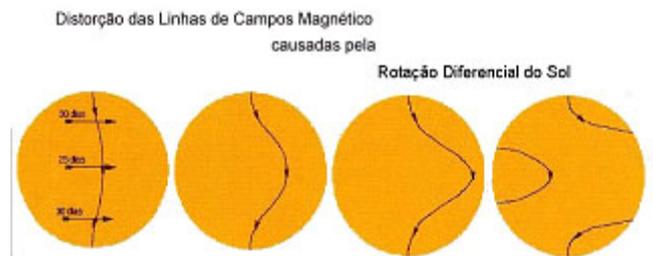


Fig.-2. A rotação diferencial do Sol. Pelo efeito de uma série de pontos alinhados sobre um meridiano solar, deixariam de estarem alinhados após uma rotação, já que os pontos próximos do equador solar são estarão mais avançados que os próximos ao pólos solar.

Um outro aspecto, que já conhecemos a muito tempo, e que podemos administrar como uma informação extremamente importante sobre sua estrutura interna, são as manchas solares [1 e 4]. Hoje sabemos que as manchas solares são estruturas com temperaturas de 2000 a 2500 graus inferior a da fotosfera [10 e 12]. Sabemos também que elas são zonas com polaridades magnéticas diferentes e, portanto, o plasma solar se orienta segundo as linhas do campo magnético. A presença de um campo magnético nas manchas solares pode ser demonstrada graças ao “efeito Zeeman”. Este efeito se produz quando alguns níveis de energia dos

elétrons nos átomos são afetados pela presença de um campo magnético, o que acaba duplicando-os. Esta circunstância permitiu demonstrar o caráter magnético das manchas e medir a intensidade do campo das mesmas, que resultou ser da ordem de 3000 gauss; contra centenas de gauss medidos na coroa solar e $\sim 10^{-6}$ gauss no meio interestelar (observe que o campo magnético terrestre é de aproximadamente 0,5 gauss, [5]).

Posteriormente, pode-se detectar a posição, ou inclinação, das linhas do campo magnético e comprovar desta forma que no núcleo de uma mancha elas estão mais apertadas formando uma espécie de tubo, entretanto na penumbra elas se inclinam para se esparramar, diminuindo sua intensidade [12]. Estes tubos magnéticos que emergem do interior do Sol parecem ser gerados e armazenados por um mecanismo denominado “dínamo solar”. Esse mecanismo ocorre na parte mais inferior da zona de convecção (a uns 200.000 km abaixo da superfície), onde permanecem mais ou menos na posição horizontal até que, curvam-se em forma de um U invertido, emergindo até a superfície dando lugar aos fenômenos visíveis que conhecemos como manchas e protuberâncias. Pela sua natureza magnética, as manchas têm uma polaridade determinada e, pela forma de gerar-se, durante todo um período de cerca de 11,2 anos mostram em um dado hemisfério com mesmo sinal ou polaridade nas manchas dianteiras de cada grupo e ao contrário nas traseiras. O mesmo ocorre no segundo hemisfério, mas com as polaridades invertidas em relação ao primeiro.

Desta forma, podemos afirmar que as manchas solares são reflexos das complexas atividades que ocorrem no interior do Sol. Assim, entendemos que, observá-las de diferentes maneiras e sistematicamente é uma enorme contribuição científica para procurarmos entender melhor o que acontece com o período de cerca de 11,2 anos, denominado de “ciclo de atividade solar”.

Neste trabalho apresentamos os dados de aproximadamente cinco ciclos solares completos, baseado em observações diretas do Sol que vem sendo realizadas desde 1956 quando o astrônomo Jean Nicolini iniciou suas observações solares em São Paulo. Essa observações vêm ocorrendo até os dias de hoje por nossa equipe em Campinas e região. Os dados estatísticos que aqui apresentamos foram medidos utilizando diferentes tipos de equipamentos devido ao longo tempo em que foram coletados. Todas essas informações foram revistas cuidadosamente, além de normalizadas para que pudéssemos fazer uma extensa análise estatística para cada ciclo solar [8].

Na seção - II apresentamos uma forma de justificar o aparecimento das manchas solares baseado na teoria do dínamo. Os métodos de observações, os equipamentos empregados e a forma com que os dados foram catalogados para o tratamento estatístico estão apresentados na seção - III. A seção - IV é dedicada à apresentação desses dados. As

comparações são discutidas na seção – V. A sexta seção é reservada para uma discussão sobre a frequência do aparecimento das maiores manchas observadas a cada ano e sua relação com o ciclo de atividade solar.

II. ENTENDENDO AS MANCHAS SOLARES

A teoria cinemática do dínamo.

De todas teorias apresentadas até hoje para explicar as manchas e os fenômenos na fotosfera solar, a teoria cinemática do dínamo é a mais aceita. Ela se baseia na semelhança do dínamo de Faraday, daí sua denominação [10 e 12].

Como vimos anteriormente, o Sol é constituído de uma matéria fluída a alta temperatura e que gira de forma diferencial em função da sua latitude. Talvez a maior surpresa seja a maneira como as camadas interiores giram – especialmente se comparadas à rotação externa peculiar do Sol. Como dissemos anteriormente, são gastos cerca de 26 dias terrestres para a fotosfera visível e a zona de convecção logo abaixo dela fazer uma revolução completa no equador solar, a uma velocidade de cerca de 7200 km/h. Essa mesma rotação leva quase 36 dias para ser completada nas altas latitudes, ou seja, perto dos pólos, porém com uma velocidade bem menor, que é de cerca de 870 km/h. Portanto, isso significa que a zona de radiação e a zona de convecção giram com velocidades muito diferentes, deslizando uma pela outra. Acredita-se que, nessas regiões ocorram áreas de cisalhamento, ou *camadas interfacial*, que formam o dínamo que, por sua vez, gera o principal campo magnético do Sol [11 e 12].

Deste modo, o movimento interno de cisalhamento estica e retorce as linhas do campo magnético existente entre os pólos solar, que se vêm forçadas a retorcer-se e a criarem bulbos devido aos ditos diferenciais de rotação. Como consequência desse processo, a energia dessas linhas de campo magnético aumenta. Por vezes essa ação criam os bulbos que se comportam, na superfície (ou fotosfera), como campos magnéticos locais com suas polaridades norte e sul, que obrigam a matéria a dispor-se de forma parecida como a que se ordenam as limalhas de ferro ao redor dos pólos de um ímã em forma de U. Esses bulbos surgem na fotosfera sob as formas de “*loops*”, protuberâncias, filamentos (que não são mais do que uma protuberância vista com a superfície solar de fundo) e as manchas solares.

Resumindo, os campos magnéticos que nascem do próprio mecanismo de dínamo, fazem com que, por oposição de polaridades com a existente inicialmente, ao final de cada processo (cerca de 11,2 anos) o campo magnético solar total inverta de sentido (Figura 3).

Após o ciclo solar de 11,2 anos, o Sol inteiro reverte sua polaridade magnética geral: o pólo magnético norte se torna pólo sul, e vice-versa. Assim,

um ciclo solar magnético completo dura em média cerca de 22 anos (Figura 3). Ninguém ainda foi capaz de compreender completamente o processo inteiro que ocorre no interior na fotosfera solar, da mesma forma que ninguém ainda consegue entender por que o campo magnético da Terra também se reverte a intervalos aparentemente aleatórios.

III. METODOLOGIA EMPREGADA PARA OBSERVAÇÃO DO SOL

Desde 1956 o Sol está sendo observado diariamente pela nossa equipe com equipamentos refratores munidos de filtros solares. Ao longo de todo esse período houve uma troca de equipamentos e de observadores, em função de diferentes circunstâncias técnicas e pessoais. A Tabela - 1 resume os tipos e características dos equipamentos utilizados, os aumentos praticados, os filtros usados, os períodos de uso desses materiais e os observadores responsáveis pelas medidas, além dos locais de observações.

O método de observação empregado foi, via de regra, o direto. Essa decisão foi tomada por ser esse método o mais eficiente que o por projeção no levantamento estatístico da atividade solar. A observação do Sol sempre que possível ocorreu logo às primeiras horas da manhã a fim de avaliar melhor o deslocamento das manchas e, sobretudo, aproveitar a maior calma da atmosfera terrestre. No momento da observação, identificava-se através de oculares as manchas e os grupos de manchas solares, classificando-as com relação aos tipos, tamanhos, posições, horário, qualidade das imagens e aspectos do céu, manchas no norte e sul (FN

The Magnetic Butterfly Diagram
average magnetic fields at the Sun's surface

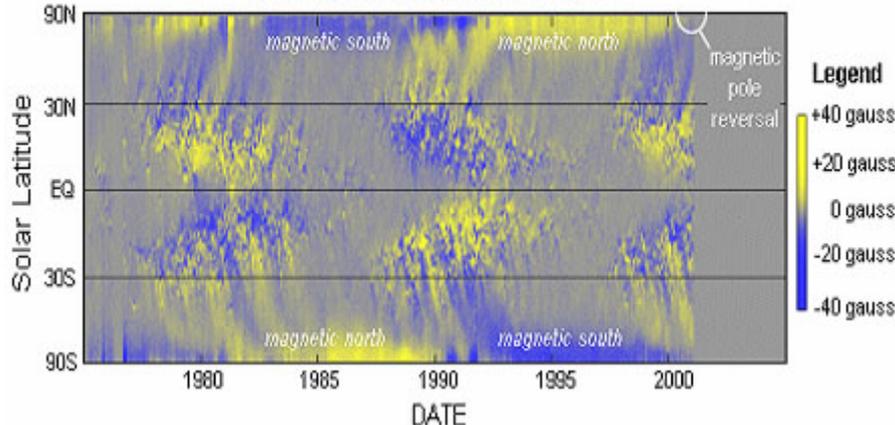


Fig.-3. O ciclo começa com linhas do campo magnético correndo de um pólo a outro – o campo gerado na camada interfacial, onde as zonas de radiação e convecção deslizam uma pela outra. Como a camada mais externa gira mais rápida na altura do equador (~26 dias) do que perto dos pólos (~36 dias), as linhas passam a distender-se. A medida que o plasma se revolve e flui, ele distorce mais essas linhas, enchendo-as de energia. Quando as linhas se tornam retorcidas, elas se elevam e rompem a superfície formando assim as manchas solares (fonte da figura: http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2001/ast15feb_1.htm).

– para manchas para o norte e FS – para manchas para o sul), grupos de manchas no norte e no sul (GN – para grupos ao norte e GS – para grupos ao sul), e finalmente o número relativo de Wolf (R).

No que se refere à classificação da manchas solares, optou-se pela Classificação dos grupos de manchas de Waldmeier do Observatório de Zürich [1, 13 e 17].

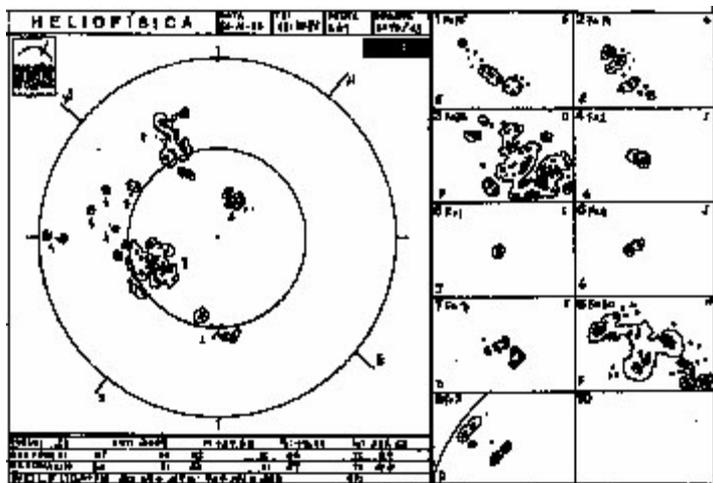
Para extrair o número de Wolf (R) do dia da observação aplicamos a clássica equação $R = K(10xG + F)$; onde K representa uma constante que está relacionada ao tipo de equipamento e o aumento empregado no momento da observação, G é o número de grupos de manchas e F representa o número de manchas.

TABELA – 1: Informações a respeito dos equipamentos empregados nesse levantamento.

Instrumento	Abertura (mm) e distância focal	Aumento	Filtro	Período	Observador	Nota
Refrator Vion	56 - F/14	65x, 90x e 100x	Negro	1956-1972	Nicolini	São Paulo
Refrator Kogaku	50 - F/15	65x	Negro	1972-1975	Nicolini	Atibaia
Refrator	76 - F/14	65x e 100x	Negro	1975-1976	Nicolini	São Paulo
Refrator	150 - F/12	57x	Solar Skreen	1976-1987	Nicolini	Campinas (*) e Americana
Refrator	135 - F/8	64x	Solar Skreen	1988-1991	Nicolini	
Refrator Vixen	80 - F/8	60x	Thousand Oaks+	1991-1992	Moser	São Paulo
Refrator	60 - F/15	72x	Negro	1993-1996	Maluf	Campinas e Monte Mor
Refletor Maksutov	150 - F/15	90x	Thousand Oaks+	1996-2000	Maluf	
Refrator Zeiss	150 - F/15	150x	Thousand Oaks+	2000-2005	Maluf	
Refletor Maksutov	127 - F/12	154x	Orion Solar	2000-2005	Maluf	
Refrator Polarex	102 - F/14,7	150x	Baader Solar	2000-2005	Maluf	

(*) Nota: por uma questão de uniformidade dos dados, não foram consideradas as observações pelo celostato de Nicolini em Campinas.

TABELA – 2: Modelo do relatório de observações. Relatório gerado para o dia 31/10/2003.



DATA	TEMP. DO DIA	TEMP. DA NOITE	TEMP. DO VENTILADOR	TEMP. DO SOL
31/10/03	24.5	19.5	24.5	24.5
R = 10.0 + F	P	G	F	
R = 10 + 0.7 F + 0.2 N	N	W	30	W
R = 10 + 0.7 F	C	W	50	
R = 10.4	3	5	0.7	0.7
A	B	C	D	E
F	G	H	I	J
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25
26	27	28	29	30
31				

Adotando essa rotina de observação, gerou-se o que chamamos de um relatório diário (HELIOFÍSICA) das observações solares. Na Tabela - 2 ilustramos um exemplo típico de um desse relatório para o dia 31 de outubro de 2003.

Os dados que aqui trabalhamos foram catalogados e gerados a partir de 1956 até 1991, com várias pesquisas e consultas realizadas nas anotações pessoais do astrônomo Jean Nicolini, e junto aos “relatórios mensais” da comissão solar do então Observatório do Capricórnio, publicados por esse no período de 1977 a 1990 [7]. A partir de 1991 iniciamos nossas próprias observações solares, realizadas na região de São Paulo (entre meados de 1991 a 1992) e Campinas - Monte Mor (de 1992 em diante). Em ambos períodos, os dados coletados sempre respeitaram os padrões de observações propostos pelos Observatórios de Zürich e AAVSO (American Association of Variable Stars Observers/Solar Division), mas usando a classificação proposta anteriormente [7 e 13]. Para o grau de visibilidade e/ou transparência da imagem solar empregou-se a nomenclatura: E (excellent) – excelente; F (fair) – muito boa; G (good) – boa-razoável; P (poor) – má-sofrível e 0 (zero), quando não ocorreu a observação. Outrossim, o percentual de nuvens existente

no momento da observação, sendo 0 (zero) para céu inteiramente descoberto, e 100 (cem) para céu totalmente nublado. O horário marcado no momento da observação foi, como de costume, o tempo universal (TU).

De posse desses dados, todos foram organizados na forma digital em planilhas geradas pelo software EXCEL [8]. Foram gerados vários arquivos contendo os dados de dia a dia de observações. A partir das informações descritas acima, calculamos as médias e os desvios padrão mensais associados ao número relativo de Wolf (R) para: manchas no hemisfério norte e sul, grupos de manchas para cada hemisfério e número R do mês em questão. A Tabela – 3 mostra um exemplo de como foram geradas as planilhas de dados observacionais para o caso do mês de novembro de 1982.

IV. APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Na seção anterior discutimos os procedimentos empregados para a coleta dos dados relativos às observações das manchas solares. Os dados apresentados nessa seção resultam das informações sintetizadas do período de 1956 a 2005 de observações diretas do Sol.

As condições gerais do tempo permaneceram de boa (G) a excelente (E) (em cerca de 42,37% dos dias observados). 14,15% do total de dias mostraram-se em condições razoáveis de observações. O restante dos dias (43,48%) não foram realizadas observações por fatores adversos (tempo ruim, condições do equipamento a desejar, ou outros motivos). A Figura 5 ilustra o histograma da distribuição das condições de visibilidade no período em que foram trabalhados os dados.

A Figura 6 mostra o gráfico da curva de atividade solar, isto é o número médio relativo de Wolf ($R_{\text{médio}}$) em função do tempo (anos). Numa rápida inspeção, podemos verificar o comportamento dos últimos cinco ciclos solares (de número 19 a 23). Cada ponto refere-se a um mês de observação. Constata-se ainda que o ciclo 19 está incompleto em dois anos, pois o mesmo iniciou-se em 1954,0.

Seria impossível apresentar aqui todos os dados digitalizados contendo todas as informações descritas na seção – III para esses 50 anos de observações. Ao invés disso, optamos em apresentar essas informações na forma de figuras, e assim apresentar as análises estatísticas das mesmas. Na Tabela – 4 apresentamos um resumo dos dados mensais para os valores médios do número relativo de Wolf ($R_{\text{médio}}$) e os desvios associados a cada medida. Nessa tabela também destacamos os momentos de mínimo (mím.) e máximo (Máx.) de cada ciclo. Em azul evidenciamos o valor do mínimo e em vermelho o valor do máximo medido.

TABELA – 3: Planilha mensal contendo os dados observacionais relevantes.

Nov./1982	V	G	F	R	GN	FN	GS	FS	
1	E0	5	38	88	4	27	1	11	
2	E0	8	29	109	5	20	3	9	
3	E0	6	22	82	3	15	3	7	
4	G50	7	30	100	4	14	3	16	
5	P80	6	14	74	3	6	3	8	
6	P80	4	12	52	4	12	0	0	
7	P90	2	9	29	2	9	0	0	
8	G0	5	19	69	2	11	3	8	
9	F0	7	17	87	2	7	5	10	
10	F10	7	27	97	6	26	1	1	
11	G80	3	20	50	1	2	2	18	
12	F80	3	28	58	1	1	2	27	
13	F70	5	45	95	1	2	4	43	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	G80	3	41	71	1	7	2	34	
17	F10	4	63	103	0	0	4	63	
18	E0	6	73	133	1	1	5	72	
19	E10	5	46	96	1	4	4	42	
20	G80	6	39	99	2	5	4	34	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	E70	8	52	132	5	23	3	29	
23	E50	5	24	74	3	10	2	14	
24	P90	3	11	41	1	1	2	10	
25	E60	5	27	77	2	8	3	19	
26	E60	5	19	69	2	7	3	12	
27	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	E50	4	22	62	1	1	3	21	
29	F60	4	34	74	1	1	3	33	
30	G70	3	18	48	1	2	2	16	
31	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total de dias:26			129	779	2069	59	222	70	557
			$R_{(m\u00e9dio)} = 79,58 \pm 28,28$		% = 35,54				

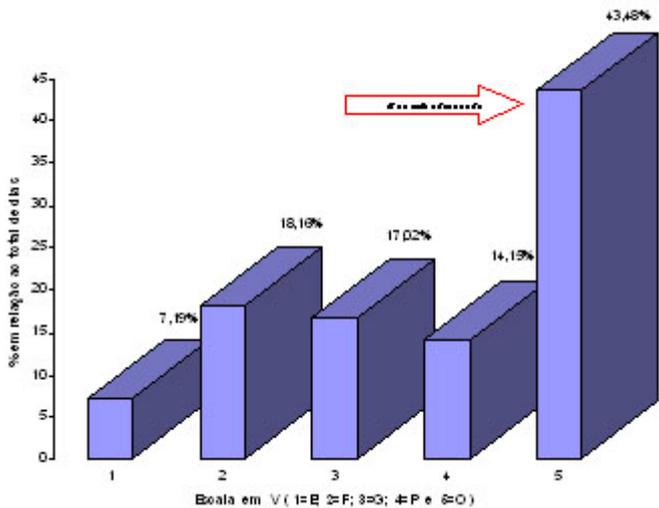


Fig.-5. Histograma resumindo as condições de visibilidade para o total de observações que dispomos. Empregou-se a nomenclatura: E (excellent) – excelente; F (fair) – muito boa; G (good) – boa-razoável; P (poor) – má-sofrível e 0 (zero) – não observado.

Uma verificação do comportamento das contagens de manchas que apareceram no hemisfério norte (N) em relação à do hemisfério sul (S) está mostrado na Figura 7. A distribuição negativa refere-se às manchas observadas ao longo do hemisfério solar sul. É possível perceber uma simetria entre as distribuições das manchas de cada hemisfério para um mesmo período, ainda que, seja possível notar diferenças entre os valores de $R_{m\u00e9dio}$ para ambos os hemisf\u00e9rios. Isso se deve à forma com que as manchas aparecem e desaparecem no disco solar. A simetria entre essas distribuições é reconhecida na figura e se deve, em parte, ao efeito descrito na teoria cinemática do d\u00ednamo (seção - II).

V. COMPARAÇÕES COM OUTROS TRABALHOS

Os cinco ciclos solares descritos na seção anterior foram comparados com dados contidos na literatura (via internet) dos seguintes centros de pesquisas que observam regularmente o Sol: *SIDC* (Solar Influences Data Analysis Center) [2, 13, e 17] e *AAVSO* (American Association Of Variable Star Observers) [14 e 15]. Todos esses \u00f3rg\u00e3os trabalham com medidas m\u00e9dias, obtidas a partir de dezenas de observadores espalhados pelo mundo que, por sua vez, empregam diferentes equipamentos, filtros, aumentos e m\u00e9todos observacionais (direto e indireto – proje\u00e7\u00e3o).

O n\u00famero internacional de manchas solares \u00e9 um \u00edndice que caracteriza a atividade solar e \u00e9 regularmente atualizado pelo Centro de An\u00e1lises de dados de Influ\u00eancia Solar (*SIDC* - localizado em Bruxelas) que possui informa\u00e7\u00f5es a respeito do Sol desde 1749 [17]. Atualmente esses dados s\u00e3o uma s\u00edntese e um reflexo das observa\u00e7\u00f5es de dezenas de astr\u00f4nomos amadores espalhados pelo mundo, que enviam seus dados para esse centro de pesquisa o qual faz suas corre\u00e7\u00f5es e publica o valor m\u00e9dio (di\u00e1rio, mensal e anual) do n\u00famero de Wolf.

Na Figura 8 mostramos simultaneamente os nossos dados e do *SIDC* para os valores de $R_{m\u00e9dio}$. A concord\u00e2ncia com os resultados encontrados por aqueles \u00f3rg\u00e3os de pesquisa \u00e9 excelente.

Os dados da *AAVSO* [14 e 15] s\u00e3o compilados a partir das observa\u00e7\u00f5es de centenas de participantes de um programa americano de observa\u00e7\u00f5es solares. Aqui existe uma ampla participa\u00e7\u00e3o de astr\u00f4nomos amadores e profissionais atuando em conjunto num esfor\u00e7o de obterem dados estatisticamente relevantes sobre o Sol. Esse programa de observa\u00e7\u00e3o solar foi iniciado em 1944 e, produz, independentemente, o \u00edndice americano de manchas solares. Na Figura 9 comparamos nossos dados com os da *AAVSO*, sempre considerando o $R_{m\u00e9dio}$ de um determinado m\u00eas. Mais uma vez percebemos um excelente acordo entre os dados que possu\u00edmos com os publicados pela *AAVSO*.

\u00c9 importante enfatizar que o desvio identificado entre os dados das Figura 8 e 9 j\u00e1 eram esperados entre nossas medidas, pois enquanto nossos

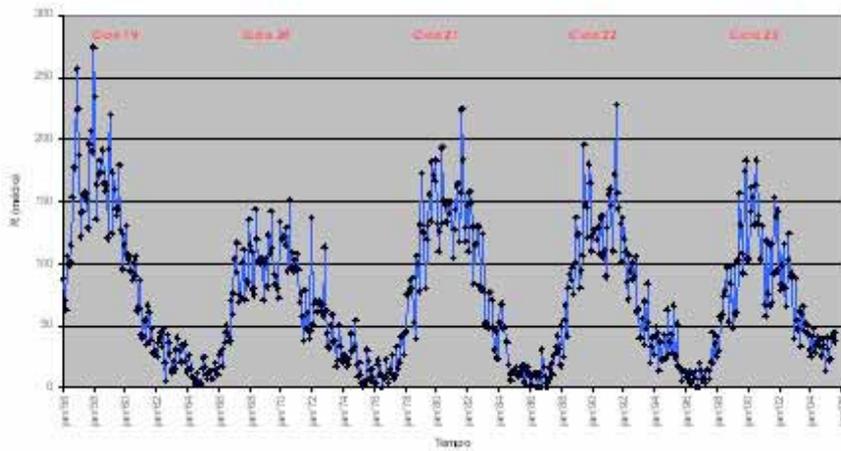


Fig.-6. Média do número relativo de Wolf para o período observado (1956-2005).

dados foram obtidos por apenas um observador, as medidas do *SIDC* e da *AAVSO* são médias realizadas com base em observações feitas por dezenas de equipamentos. Neste sentido, a média registrada das diferenças entre as medianas (outros-nossos) foi de $12,30 \pm 1,96$, e o espalhamento encontrado de 4,04. Esses resultados são consistentes com os erros internos estimados para as nossas medidas do número relativo de manchas solares (Tabela – 4). Na Tabela – 5 mostramos os desvios calculados a partir das medianas para as diferenças entre nossos dados e da literatura "R_médio(*SIDC*) e "R_médio(*AAVSO*).

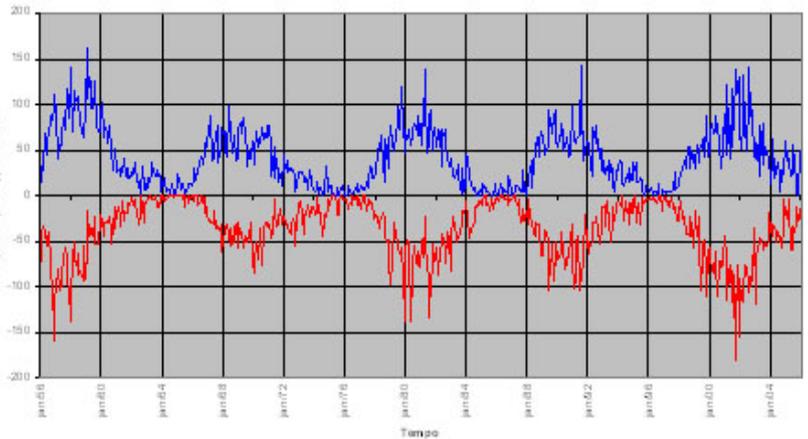


Fig.-7. Distribuição das contagens de manchas nos hemisférios norte (azul) em relação ao hemisfério sul (vermelho) ao dos anos.

TABELA – 5: Comparações entre nossos dados e do *SIDC* e da *AAVSO*.

Ciclo	"R_médio(<i>SIDC</i>)	"R_médio(<i>AAVSO</i>)
19	-26,15±2,47	23,68±2,53
20	3,59±0,76	6,19±1,21
21	14,82±1,78	23,67±2,57
22	10,70±1,24	28,60±2,97
23	18,42±1,98	19,54±2,04

feita ao ciclo 19 onde percebemos que o nosso valor é mais elevado que o do *SIDC*. Os comportamentos que avaliamos nas Figuras 8, 9 e 10 reforçam a boa qualidade que possui os nossos dados que nos envolvemos, uma vez que todos estão contidos nas barras de erros calculadas.

VI A DISTRIBUIÇÃO DAS MAIORES MANCHAS

As observações pelo método direto foram acompanhadas não apenas pelas contagens das manchas e grupos de manchas como descrito na seção – III, nelas também estão contidos os elementos da classificação de Waldmeier [13], que nesse caso referem-se a desenhos feitos pelos observadores das manchas e grupos de manchas. Para verificarmos uma possível correlação entre a frequência das maiores manchas que apareceram ao longo de cada ano com cada ciclo solar correspondente, selecionamos os desenhos onde a ocorrência evidente da maior mancha se fazia presente. A Figura 11 ilustra um exemplo de uma maior mancha observada no dia 17 de outubro de 2001, época em que o Sol estava passando pelo máximo

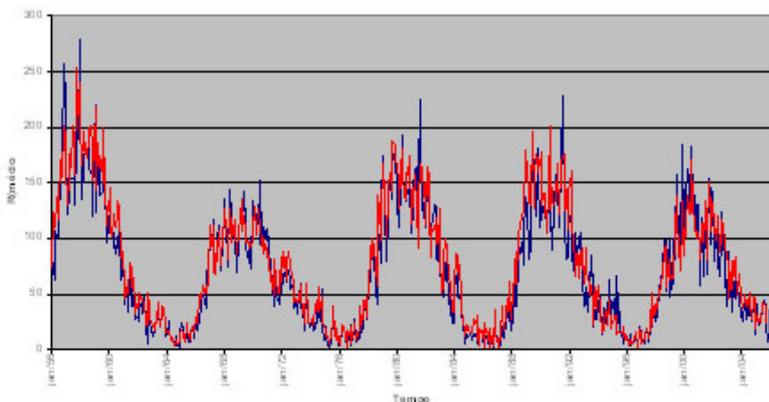


Fig.-8. Comparações dos nossos dados (preto) com os do *SIDC* (vermelho).

TABELA – 4: Dados mensais do número relativo de Wolf ($R_{\text{médio}}$) para o período observado.

Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média	Desvio	OBS:
1956	87,9	69,6	62,5	106,6	99,0	101,6	114,9	153,9	177,1	177,4	256,8	224,4	136,0	61,9	
1957	187,1	121,9	141,4	155,8	154,1	154,6	151,2	130,3	187,3	207,1	189,6	278,2	171,5	42,4	Máx.
1958	234,8	135,7	164,6	172,4	182,4	172,2	191,6	164,2	158,7	164,9	120,7	189,5	171,0	28,6	
1959	220,2	124,0	173,8	158,9	139,2	139,5	142,7	178,8	126,8	124,2	96,2	113,3	144,8	33,7	
1960	130,8	108,4	103,8	104,2	94,0	86,9	100,6	91,6	105,5	61,9	64,5	86,4	94,9	18,9	
1961	43,1	40,6	53,7	55,0	34,2	66,0	60,4	38,7	47,9	27,6	29,4	29,6	43,9	12,8	
1962	24,8	36,3	40,4	44,0	33,0	47,3	20,2	5,8	43,2	36,1	27,6	15,0	31,1	12,7	
1963	12,6	21,2	16,0	30,3	40,3	29,8	30,0	34,4	33,2	35,3	21,7	12,8	26,5	9,3	
1964	14,5	25,9	15,7	8,9	7,7	7,5	3,1	12,1	3,3	4,1	2,5	14,8	10,0	6,9	min.
1965	24,2	16,4	10,6	6,8	13,2	13,6	7,2	7,6	13,8	19,9	14,8	10,7	13,2	5,2	
1966	27,0	29,7	17,2	31,0	36,1	44,1	49,7	42,0	37,5	70,8	58,7	76,0	43,3	17,8	
1967	103,9	92,9	116,6	68,7	74,4	70,4	101,3	111,5	70,7	87,0	84,6	135,6	93,1	21,2	
1968	116,9	109,8	79,6	74,6	144,0	119,6	103,3	99,9	107,6	99,3	70,1	99,8	102,0	20,6	
1969	104,0	120,9	122,4	107,6	142,0	112,2	92,9	82,8	90,4	79,7	72,5	133,8	105,1	22,1	
1970	119,5	120,8	122,3	115,0	129,4	94,2	151,6	97,0	109,9	94,0	107,3	98,4	113,3	17,0	Máx.
1971	108,0	95,6	68,7	75,4	57,8	38,2	78,3	47,9	44,1	39,9	43,4	67,8	63,8	22,7	
1972	50,7	67,4	69,9	60,2	69,1	71,0	60,3	53,8	57,8	59,5	36,6	43,7	58,3	10,7	
1973	32,7	33,4	49,7	58,5	37,1	38,4	16,8	21,9	51,0	33,2	23,2	20,0	34,7	13,2	
1974	25,9	24,1	16,9	23,9	19,1	29,4	44,4	30,3	24,8	54,5	18,8	8,5	26,7	12,3	
1975	19,8	11,0	2,7	1,4	4,8	5,4	30,4	21,7	14,4	8,0	15,0	3,8	11,5	9,0	
1976	3,3	3,9	18,5	21,1	11,3	9,6	0,0	8,1	9,4	22,9	4,1	12,1	10,4	7,3	min.
1977	14,5	26,8	7,0	9,8	10,6	32,7	15,8	20,9	40,9	41,2	26,6	43,9	24,2	13,2	
1978	45,4	73,8	77,1	86,9	80,5	88,1	52,4	40,0	106,5	99,5	77,9	131,3	80,0	26,0	
1979	173,6	126,1	125,1	79,9	118,9	131,0	155,6	134,6	180,5	171,5	166,7	183,3	145,6	31,3	
1980	131,8	110,4	126,9	132,6	193,5	151,1	147,2	133,2	149,1	140,5	148,7	150,1	142,9	20,0	
1981	104,3	127,7	143,7	162,5	164,2	117,2	157,5	224,2	183,5	129,6	117,6	146,8	148,2	33,3	Máx.
1982	110,6	157,6	149,9	129,5	83,2	114,1	116,2	130,2	128,0	81,9	79,6	123,7	117,0	25,3	
1983	77,4	51,7	50,6	48,0	77,4	77,4	70,9	49,2	30,7	45,4	24,3	23,1	52,2	20,0	
1984	51,8	67,2	67,8	47,6	49,2	38,4	36,7	18,1	11,4	6,1	12,9	12,7	35,0	22,2	
1985	11,7	16,2	9,4	9,1	14,0	12,8	17,8	4,9	2,5	14,1	16,9	9,7	11,6	4,7	
1986	2,1	9,1	9,9	12,4	9,1	0,0	11,8	8,4	0,0	30,7	16,8	8,3	9,9	8,3	min.
1987	3,4	0,0	6,9	15,7	20,0	10,8	26,2	32,8	29,2	42,0	32,1	17,7	19,7	13,0	
1988	50,0	24,6	53,9	66,6	42,1	80,7	91,1	86,5	96,1	75,6	101,6	136,8	75,5	30,4	
1989	122,4	124,5	80,4	94,2	106,5	195,6	174,7	145,6	120,9	179,9	164,7	110,4	135,0	36,7	
1990	123,5	127,7	127,2	119,1	129,6	107,9	136,6	138,1	105,7	110,6	89,3	128,9	120,4	14,4	
1991	156,0	160,6	146,6	111,0	109,5	171,9	228,6	156,6	144,4	132,4	101,6	137,1	146,4	34,0	Máx.
1992	120,0	110,0	85,3	71,5	105,9	93,8	86,9	100,6	90,4	105,5	61,9	63,9	91,3	18,4	
1993	39,4	40,5	55,9	34,6	69,5	47,3	84,0	52,8	19,8	33,2	40,3	26,9	45,4	18,1	
1994	41,2	49,2	43,9	14,0	37,0	21,4	23,6	43,0	23,8	63,0	27,0	37,0	35,3	13,9	
1995	42,7	28,0	66,0	27,0	24,5	51,5	17,3	15,9	5,7	13,9	14,0	13,0	26,6	18,0	
1996	8,9	6,8	13,0	3,8	4,9	11,6	7,4	13,9	0,0	0,0	19,9	13,3	8,6	6,0	min.
1997	6,9	8,6	4,7	13,5	15,4	13,5	7,0	21,2	44,4	19,9	35,9	41,3	19,4	13,8	
1998	25,6	30,0	57,6	54,1	59,9	73,8	78,0	97,1	97,5	53,1	83,9	97,8	67,4	24,9	
1999	48,1	59,7	99,4	59,3	103,6	156,9	131,3	107,6	92,3	174,7	183,0	104,0	110,0	44,4	
2000	103,1	141,5	161,8	153,6	131,3	163,3	183,1	132,9	139,0	103,6	130,2	130,3	139,5	23,5	Máx.
2001	67,4	57,5	118,2	75,8	65,5	115,2	68,5	91,1	153,7	137,8	94,3	142,5	99,0	33,6	
2002	79,1	83,0	98,8	116,4	76,1	65,5	103,0	123,6	90,4	92,2	68,8	39,6	86,4	23,1	
2003	88,3	54,6	47,0	62,0	33,4	59,3	65,6	46,2	51,9	51,0	43,5	30,7	52,8	15,3	
2004	25,6	43,5	47,9	27,8	34,0	41,0	38,6	34,0	25,8	39,9	34,1	13,7	33,8	9,4	
2005	40,5	31,9	22,9	23,7	40,9	41,3	44,6	37,5	21,4	7,7	14,0	37,6	30,3	12,1	

do atual ciclo solar (o ciclo 23). A partir da seleção desses desenhos, fizemos uma medida estimada da superfície de cada mancha em relação ao hemisfério visível. Na Tabela – 6 listamos essas informações onde, para um dado ano, temos o mês, o dia, o valor do $R_{\text{médio}}$ daquele correspondente ano e, o valor estimado da superfície da mancha solar. A medida da superfície de uma determinada mancha solar está em unidade aleatória e tomada como base em: $\text{VALOR} \times 10^{-6}$ do hemisfério visível.

Para podermos comparar a frequência da maior mancha com o número relativo de Wolf, multiplicamos os valores deste último por 30. A Figura 12 mostra a relação entre essas duas informações com o tempo (em anos). Nela vemos a existência de uma correspondência nas variações dos máximos (valores são

sem dimensões e absolutos). A correspondência é notável para o ciclo 20 e ajusta-se bem para os ciclos restantes.

A maior mancha registrada no período foi em 17/10/1981 com uma superfície de 3697×10^{-6} do hemisfério visível e situada no recém passado máximo do ciclo 21 (período: 1976,6 - 1986,5). Vale ressaltar que neste ciclo se registrou o período de ascensão mais rápido dos últimos 50 anos de observações, com um tempo de ascensão de 4,7 anos (que está abaixo da média apresentada literatura, que gira em torno de 5,1 anos). Este ciclo chegou ao seu máximo em 1979,8 com um $R_{\text{médio}}$ de 148,92 (também entre os mais altos valores).

Os resultados mostram, como já esperávamos, uma relação direta entre a atividade solar e o aparecimento de grandes manchas. Isso fica evidente

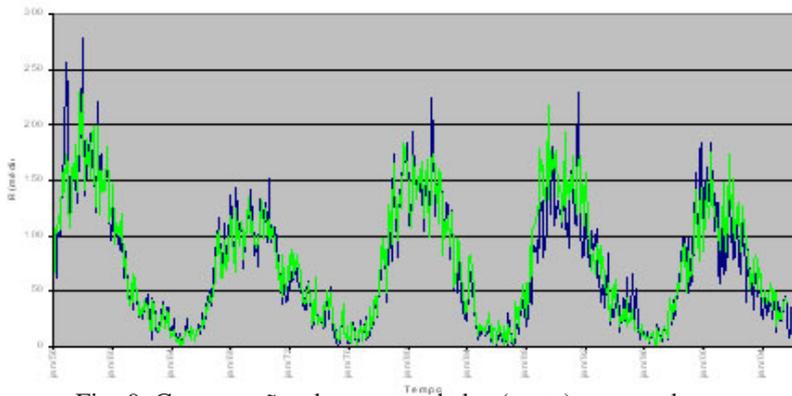


Fig. 9. Comparações dos nossos dados (preto) com os do AAVSO (verde).

na Figura – 12, pois praticamente cada ciclo solar acompanha o freqüência das maiores manchas. Aqui podemos interpretar que o aparecimento de manchas cada vez maiores recebe a influência na atividade do meio interno à fotosfera. Estando essa atividade em alta, o campo magnético no interior da fotosfera também será elevado, ocasionando desta forma a formação de grandes manchas, além de menores em situações mais esporádicas. Os resultados obtidos aqui vem apenas reforçar esta hipótese da atividade solar e com certeza tem ligações com fenômenos terrestres (clima, registros geológicos, posicionamento de GPS (Global Positioning System), dentre outros) [6].

VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma breve revisão sobre o mecanismo de formação das manchas solares, tomando como base o modelo da teoria cinética do dínamo [10 e 12]. Através desse modelo, entendemos que as manchas aparecem na fotosfera solar por se manifestarem intensos campos magnéticos que bloqueiam a convecção da matéria abaixo da sub-fotosfera.

Apresentamos a metodologia empregada num levantamento de contagens de manchas e grupos de manchas solar realizado ao longo dos últimos

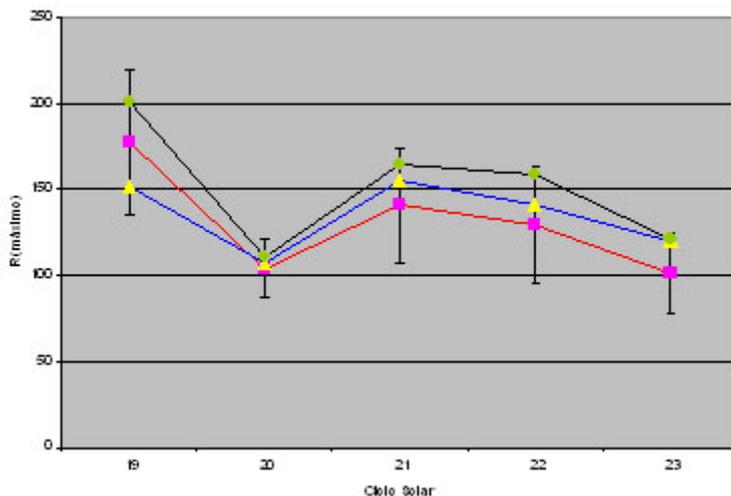


Fig. 10. Comparações dos máximos de cada ciclo. Nossos dados (vermelho) contra: SIDC (azul) e AAVSO (preto). As barras de erros são as dispersões medidas para os nossos dados.

0 anos (1956 a 2005), utilizando um rocedimento uniforme e confiável para extração e informações científicas relevantes. A partir esses dados, reconstruímos o ciclo de atividade solar, onde foram identificados os ciclos de número 19 (parcial), 20, 21, 22 e o atual ciclo 23.

Analizamos todos dados observados e, agora, temos essas informações disponíveis na forma digital (dia a dia, mês a mês ano a ano), o que correspondem a quase 87500(!) dados envolvidos em todo esse trabalho e pesquisa. Devido a problemas de espaço, apresentamos todas as informações em forma de tabelas e figuras gráficas.

Fizemos as comparações da curva de atividade solar e dos valores dos máximos de $R_{\text{médio}}$ para cada ciclo com os dados disponíveis na literatura (SIDC e AAVSO) [2, 14, 15 e 17]. Em geral, constatamos que nossos dados estão em excelente acordo com os dados desses outros centros de pesquisas solar.

Lançando mão das informações relativas ao tamanho superficial das manchas, selecionamos e estimamos a superfície da maior mancha solar em cada de observação. Esses valores foram comparados com o ciclo de atividade solar e revelou-se uma boa correlação com a freqüência das maiores manchas que apareceram no período.

O propósito desse levantamento é o de prover dados independentes de outros órgãos de pesquisas no exterior, para um extenso estudo das influências solar sobre os diversos parâmetros terrestres. Com esse propósito, pretendemos identificar e estudar possíveis correlações que existam entre os ciclos de atividade solar e os seguintes parâmetros: climáticos (temperaturas, pressão, índice pluviométrico, irradiância e as concentrações de CO_2 e SO_2), ambientais [9], tecnológicos [4 e 6], dentre outros. Um estudo sobre o problema da previsão [para um resumo vide 3] do término do atual ciclo solar e o comportamento do próximo (ciclo 24), também estão sendo contemplados nos nossos projetos de pesquisas.

IX. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Prof. Paulo Roberto Moser pela gentileza de nos fornecer vários dados solares coletados ao longo de alguns anos (período 1992-1995) e que serviram de comparações com os que possuímos na nossa lista principal. Agradecemos o técnico José Renato Maia pelas sugestões e pela revisão feita nos manuscritos desse trabalho. LP, RCP e JCP agradecem parte dos recursos vindos através do DGRH e da PROPESQ da PUC-Campinas (bolsa FAPIC para LP). WJM e JCP agradecem ao OMC-JN da Prefeitura de Municipal de Campinas cortesia de dispor parte dos dados aqui apresentados e pelos recursos aplicados a essa pesquisa.

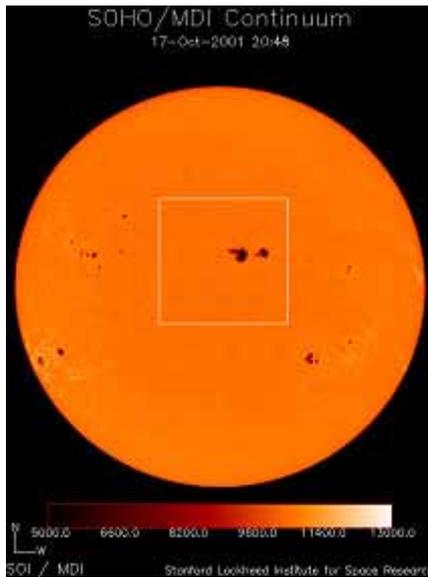


Fig.-11. Imagem do dia 17 de outubro de 2001 da sonda SOHO/MDI [16]. Identifica-se uma imensa mancha detectada em pleno máximo de atividade solar.

TABELA – 6: Medidas da superfície da maior mancha (unidades: VALORx10⁶ do hemisfério visível, para maiores detalhes vide o texto).

Ano	Mês	Dia	R(anual)	Superfície	Ano	Mês	Dia	R(anual)	Superfície
1956	9	7	135,96	2299	1981	10	17	148,23	3697
1957	10	16	171,53	2482	1982	6	14	117,09	3299
1958	6	8	170,98	3256	1983	5	14	52,18	2109
1959	1	8	144,80	2799	1984	4	26	34,94	1591
1960	5	13	94,87	2307	1985	4	23	11,59	843
1961	9	2	44,84	1444	1986	2	3	9,84	703
1962	3	19	31,13	1847	1987	5	22	19,75	804
1963	9	21	25,70	1309	1988	6	29	75,39	1901
1964	1	30	10,01	547	1989	3	17	132,86	3600
1965	5	15	13,24	732	1990	11	18	120,65	3078
1966	4	2	43,32	1598	1991	3	25	131,42	2532
1967	12	22	93,14	2232	1992	10	30	91,08	1648
1968	2	1	102,02	3204	1993	2	10	45,34	1277
1969	10	21	105,11	2777	1994	1	1	35,44	727
1970	11	17	113,28	2509	1995	10	12	26,61	432
1971	8	21	63,75	2328	1996	11	25	8,62	878
1972	10	26	58,34	2247	1997	11	4	19,35	992
1973	4	30	34,66	922	1998	9	3	67,37	1463
1974	4	16	26,72	1702	1999	8	2	110,03	2382
1975	8	8	11,53	1293	2000	9	20	139,47	2638
1976	3	28	10,36	938	2001	3	29	98,96	2438
1977	6	27	24,21	1180	2002	8	19	86,37	1991
1978	2	14	79,95	1923	2003	10	29	52,79	2608
1979	11	7	145,57	1722	2004	7	21	33,81	2008
1980	11	11	142,92	2298	2005	1	16	30,33	1640

X. REFERÊNCIAS

[1] CASAS, R., OLIVER, J. M., RAIMON, R. e TOMÀS, L.; “La observación del Sol”, **ASTRUM**, **116**, 3, (1994).
 [2] CUGNON, P. “Solar Influences Data Analysis Center – Brussels (1999)” <http://www.oma.be/KSB-ORB/SIDC/index.html>; acesso em 16/nov./2005.
 [3] DENKMAYR, K e CUGNON, P., “About Sunspot Number Medium-Term Predictions”, in “Solar-Terrestrial Prediction Workshop V”, eds. G. Heckman et al., Hiraiso Solar Terrestrial Research Center, Japan, 103, (1997).
 [4] ECHER, E., RIGOZO, N. R., NORDEMANN, D. J. R., VIEIRA, L. E. A., PRESTES, A. e DE FARIA, H. H.; “O Número de Manchas Solares, Índice da Atividade do Sol”, **Revista Brasileira de Ensino de Física**; **157**, jun., (2006).
 [5] LANG, K. R.; “Effects which alter the emitted line frequency”, in: **Astrophysical Formulae – a compendium for the Physicist and Astrophysicist**, 2nd. Edition, Springer-Verlag, pg 186, (1980).
 [6] MATSUOKA, M.T, CAMARGO, P. O. e POZ, W. R. D; “Declínio do Número de Manchas Solares do Ciclo 23: Redução da Atividade Ionosférica e Melhora da Performance do Posicionamento com GPS”, **Bol. Ciênc. Geodésia. - Sec. Artigos - Curitiba**, **10**, (2), 141, jul-dez., (2004).
 [7] NICOLINI, J. “Boletim de Atividade Solar do Observatório do Capricórnio”, Estação Astronômica Municipal de Campinas;

Comissão Solar do Observatório do Capricórnio, Campinas, SP, (período: 1977-1990)
 [8] PARRA, L. e PENEREIRO, J.C.; “Atividade Física no Sol: Um Estudo Estatístico de Manchas Solares”, **Resumos do X Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas**, pg. 57, (2005).
 [9] RIGOZO, N. R e NORDEMANN, D. J. R; “Registros da Atividade solar nos anéis de Crescimento de Árvores em São Francisco de Paula – RS (Brasil)”, **Ver. Brás. de Geofísica**, **18**, (1), (2000).
 [10] SCHRIJVER, C. J. e TITLE, A. M.; “Today’s Science of the Sun – Part 1”, **Sky and Telescope**; **34**, feb. (2001).
 [11] SCHRIJVER, C. J. e TITLE, A. M.; “Today’s Science of the Sun – Part 2”, **Sky and Telescope**; **34**, mar. (2001).
 [12] SUPLEE, C.; “Luz e calor: Uma estrela tempestuosa – O Sol”, **National Geographic – Brasil**, **36**, jul., (2004).
 [13] WALDMEIER, M. “The Sunspot Activity in the Years 1610-1960”, Zürich Schulthess and Company, Switzerland, (1961).
 [14] <http://www.aavso.org>; acesso em 02/fev./2006.
 [15] <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/SSN/ssn.html>; site do NOAA, acesso em 07/mar./2006.
 [16] <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>; site da sonda SOHO (The Solar and Heliospheric Observatory), acesso em 09/mar./2006.
 [17] <http://www.sidc.oma.be>; acesso em 12/set./2005.

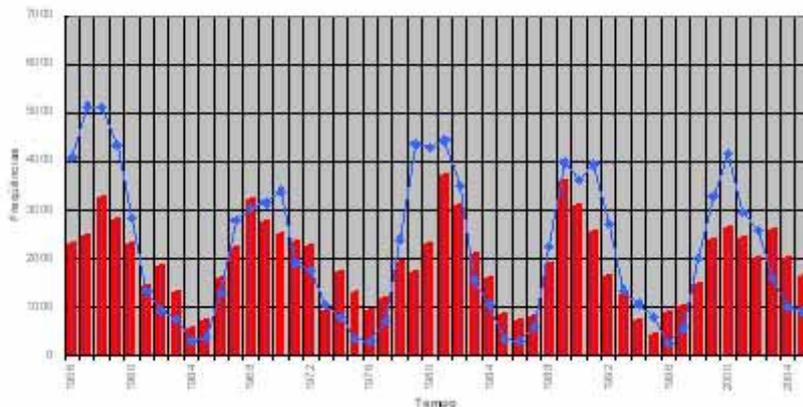


Fig.-12. Frequência das maiores manchas em relação à atividade solar para o período analisado.

J. C. Penereiro^{1a,b,2,3}, L. Parra^{1a}, R. C. Pellegrini^{1b} e W.J. Maluf³ 1 - Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. (a) Faculdade de Matemática. (b) Faculdade de Engenharia Ambiental. CEP 13086-900, Campinas - SP – Brasil. 2 - Instituto de Física ‘Gleb Wataghin’. Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia. C. Postal 6165, Barão Geraldo, CEP 13083-970, Campinas - SP – Brasil. 3 – Observatório Municipal de Campinas. C. Postal: 2027, Sousas, CEP 13106-970, Campinas - SP – Brasil. E-mail: jcp@puc-campinas.edu.br e wjmaluf@yahoo.com.br