

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE FÍSICA BACHARELADO**

**ESTUDO DA ATIVIDADE SOLAR NO PASSADO EM
FUNÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Giuliano Damião

Santa Maria, RS, Brasil

2013

ESTUDO DA ATIVIDADE SOLAR NO PASSADO EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA

Giuliano Damião

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Física Bacharelado na
disciplina de Trabalho de Graduação em Física

Orientador: Dr. Nivaor Rodolfo Rigozo.

Coorientador: Dr. Nelson Jorge Schuch.

Santa Maria, RS, Brasil

2013

iii

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer primeiramente à meus pais, Vladimir e Albimari, e minhas irmãs, Érika e Vitória, e meu irmão, João Guilherme (*in memorian*), por todo o apoio, esforço e paciência que tiveram comigo durante todo o tempo de graduação. Agradeço também aos meus avós Vitório, Edda, Carlos (*in memorian*) e Maria Tereza por sempre apoiarem meus estudos e me darem forças para seguir estudando.

Agradeço ao meu Orientador, Dr. Nivaor Rodolfo Rigozo, e a meu coorientador, Dr. Nelson Jorge Schuch, por sempre estarem a disposição para me ajudar e por me criticarem, nas vezes em que era necessário.

Agradeço aos meus amigos da faculdade Luiz Felipe Kremer, Douglas William Duarte de Vargas, Douglas Franco Pinto, Rafael Maroneze, Larissa Sihe, Gabriela Copetti, Greci Gubert e aos demais colegas pelo companheirismo e apoio.

Agradeço, do fundo de meu coração ao INPE – CRS, à UFSM e ao Governo Federal por me propiciarem espaço físico e a possibilidade de desenvolvimento da pesquisa. Também gostaria de agradecer ao CNPq por me fornecer bolsas de estudo durante minha vida acadêmica.

Um agradecimento especial ao professor Antônio Carlos Lyrio Bidet, pelas inúmeras ajudas, tanto em problemas matemáticos quanto de programação, e à Raquel Freitas, por sempre dar aquela mãozinha na hora de solicitar as disciplinas para cada novo semestre.

RESUMO

Trabalho de Graduação em Física
Departamento de Física
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO DA ATIVIDADE SOLAR NO PASSADO EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA

Autor: Giuliano Damião
Orientador: Nivaor Rodolfo Rigozo
Coorientador: Nelson Jorge Schuch
Local de Defesa: Santa Maria, RS.

O estudo da radiação cósmica que chega à Terra representa um importante registro de suas variações, bem como dos fenômenos físicos que causam estas variações. No sistema solar a radiação cósmica é fortemente modulada pelo campo magnético do Sol, através do vento solar. Essa modulação faz com que ocorra uma correlação inversa entre os raios cósmicos e a atividade solar. Quando os raios cósmicos chegam na atmosfera da Terra eles interagem com a mesma e produzem os chamados Cosmonuclídeos Atmosféricos, tais como o Carbono-14 (^{14}C), o Berílio-10 (^{10}Be), entre outros. Assim, ao se estudar os registros dos cosmonuclídeos (^{14}C em anéis de árvores e ^{10}Be em amostras de gelo) é possível obter informações da atividade solar no passado, uma vez que a mesma deve apresentar uma correlação inversa com os Cosmonuclídeos Atmosféricos. No estudo foram utilizadas séries temporais representativas da radiação cósmica que chega na Terra (através dos Cosmonuclídeos Atmosféricos ^{14}C e ^{10}Be), bem como, dados representativos da atividade solar (número de manchas solares). As séries temporais utilizadas apresentam resolução temporal anual. No estudo das séries temporais foram utilizados os métodos de análise matemática de correlação e regressão linear, além do método de regressão iterativa, para a reconstrução da atividade solar no passado a partir dos Cosmonuclídeos Atmosféricos. Com o resultado das regressões obtidas foram encontrados períodos chave da atividade solar nos últimos 1000 anos, tais como os períodos de mínimo de Spörer, Maunder, Dalton, Wolf e o período de máximo Medieval. Além disso foram geradas regressões da atividade solar com módulo de grau de correlação de até 0,74.

Palavras-chave: Cosmonuclídeos Atmosféricos. Radiação Cósmica. Atmosfera Terrestre. Manchas Solares.

ABSTRACT

Final Undergraduate Assignment in Physics
Physics Department
Universidade Federal de Santa Maria

STUDY OF SOLAR ACTIVITY IN THE PAST IN FUNCTION OF COSMIC RADIATION

Author: Giuliano Damião
Adviser: Nivaor Rodolfo Rigozo
Co-adviser: Nelson Jorge Schuch
Local de Defesa: Santa Maria, RS.

The study about cosmic radiation arriving the Earth represents an important register of its variations, as the physical phenomena who cause these variations. In the solar system the variation is strongly modulated by the Sun's magnetic field through the solar wind. This modulation makes that occurs an inverse correlation between cosmic rays and solar activity. When the cosmic rays arrive in Earth's atmosphere they interact with the atmosphere and produce the Atmospheric Cosmonuclides, like the Carbon-14 (^{14}C), and Beryllium-10 (^{10}Be), among others. Thus studying the records of this cosmonuclides (^{14}C on tree rings, and ^{10}Be on ice cores) we will be able to obtain information about the solar activity in the past, once this must show an inverse correlation with the Atmospheric Cosmonuclides. In this work it used time series about cosmic radiation arriving the Earth (using the Atmospheric Cosmonuclides ^{14}C and ^{10}Be), as representative data of solar activity (sunspot numbers). The used time series have a yearly temporal resolution. In the time series study was used mathematical analysis of correlation methods and linear regression, as the method of iterative regression, to the reconstruction of solar activity in the past by the Atmospheric Cosmonuclides. As the result of these regressions key periods were obtained of the solar activity in the last 1000 years, as the minimum periods of Spörer, Maunder, Dalton, Wolf and the maximum Medieval period. In addition solar activity regressions was generated with module of correlation degree up to 0,74.

Keywords: Atmospheric Cosmonuclides. Cosmic Radiation. Earth's Atmosphere. Sunspot.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Ilustração esquemática do Sol.	3
Figura 3-2: Campo magnético interplanetário como espiral de Arquimedes.	5
Figura 3-3: Ilustração esquemática da Heliosfera e suas principais características	5
Figura 3-4: Imagem de uma mancha solar.	7
Figura 3-5: Diagrama indicando pares de manchas com polaridade oposta em ambos os hemisférios solares.	7
Figura 3-6: Em A temos o número de manchas solares. Em B, temos os registros pelos detectores de neutrons. Mc, Sw, SP e Th denotam, respectivamente, os monitor de neutrons de Murdo, Swarthmore, Polo Sul e Thule.	10
Figura 3-7: Série temporal da produção de carbono 14.	13
Figura 3-8: a) média anual do número de manchas solares de Wolf; b) média anual do número de grupo de manchas solares; c) espectro do <i>Rz</i> pelo ARIST; d) espectro do <i>RG</i> pelo ARIST.	14
Figura 3-9: Comparação entre série reconstruída e série original do número de manchas solares.	14
Figura 3-10: Reconstrução da atividade solar no período de 1000-1999.	15
Figura 3-11: Reconstruções do número de manchas solares de Wolf (curva pontilhada) desde 850 pelo modelo "curto" (A). A curva preta grossa é referente à série de carbono 14 (C14), a curva cinza se refere à série de berílio 10 (BeS) e a curva preta fina é referente série de Auroras (Au+WX).	16
Figura 3-12: Média de 10 anos das manchas solares reconstruídas a partir dos dados de variação de carbono 14 desde 9500 A.C. (curva azul) e média de 10 anos do grupo de manchas solares (GSN) obtidos de observações de telescópios desde 1610 (curva vermelha).	17
Figura 4-1 Gráfico do número de manchas solares em resolução anual.	18
Figura 4-2: Série Temporal da razão de produção de C14.	19
Figura 4-3: Concentração de Be10 em testemunho de gelo no Polo Sul da Antártica.	19
Figura 4-4: Manchas Solares – Média corrida de 22 anos.	20
Figura 5-1: Gráfico C14 no intervalo de Referência.	25
Figura 5-2: Gráfico Be10 no intervalo de Referência.	26
Figura 5-3: Retas de Correlação entre Média corrida de 22 anos das manchas solares e C14.	26
Figura 5-4: Retas de correlação entre a média corrida de 22 anos das manchas solares e o Be10.	27
Figura 5-5: Reconstrução da ativmédia corrida de 22 anos das manchas solares entre 1100-1900 pelo C14 - M1.	28
Figura 5-6: Reconstrução da média corrida de 22 anos das manchas solares entre 1000-1900 pelo Be10 - M1.	28
Figura 5-7: Resultados gerados pelo ARIST para o C14 - M2. A) representa o gráfico da concentração de C14 em função do tempo. B) mostra a análise espectral da série temporal de C14.	29
Figura 5-8: Resultados gerados pelo ARIST para o Be - M2. A) representa o gráfico da concentração de Be10 em função do tempo. B) mostra a análise espectral da série temporal de Be10.	30

Figura 5-9: Resultados gerados pelo ARIST para a média corrida de 22 anos das manchas - M2. A) representa o gráfico média corrida de 22 anos das manchas solares em função do tempo. B) mostra a análise espectral da série temporal da série corrida de 22 anos das manchas solares.	31
Figura 5-10: Série de Manchas Solares reconstruídas pela análise espectral - M2.....	32
Figura 5-11: Reta de Correlação C14 reconstruído - M2.	32
Figura 5-12: Reconstrução da Atividade Solar pelo C14 de 1100-1900 por M2.	33
Figura 5-13: Resultados gerados pelo ARIST para a Reconstrução da Atividade Solar pelo C14 em M1. A) representa o gráfico da Reconstrução da Atividade Solar pelo C14 em M1. B) mostra a análise espectral da reconstrução.	34
Figura 5-14: Resultados gerados pelo ARIST para a Reconstrução da Atividade Solar pelo Be10 em M1. A) representa o gráfico da Reconstrução da Atividade Solar pelo Be10 em M1. B) mostra a análise espectral da reconstrução.	35
Figura 5-15: Reconstrução da Atividade Solar a partir dos resultados do C14 em M1 - M3. .	36
Figura 5-16: Reconstrução da Atividade Solar a partir dos resultados do Be10 em M1 - M3.	36
Figura 5-17:Reconstrução pelo C14 - M1 entre 1700 - 1900.....	37
Figura 5-18: Reconstrução pelo Be10 - M1 entre 1700 - 1900.....	37
Figura 5-19:Reconstrução pelo C14 – M2 entre 1700 – 1900.	38
Figura 5-20: Reconstrução pelo C14 de M1 - M3 entre 1700 - 1900.	38
Figura 5-21: Reconstrução pelo Be10 de M1 - M3 entre 1700 - 1900.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela de dados gerada pelo ARIST para o C14 -M2.....	29
Tabela 2: Tabela de dados gerada pelo ARIST para o Be10 -M2.....	30
Tabela 3: Tabela de dados gerada pelo ARIST para a média corrida das Manchas Solares -M2.	30
Tabela 4: Resultados obtidos pelo ARIST para a reconstrução da atividade solar pelo C14 em M1.....	34
Tabela 5: Resultados obtidos pelo ARIST para a reconstrução da atividade solar pelo Be10 em M1.....	35
Tabela 6: Resultados de correlação entre resultados obtidos e série da média corrida de 22 anos das manchas solares.	39

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	2
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 – Atividade Solar	3
3.2 – Campo Heliomagnético	4
3.3 – Vento Solar	6
3.4 – Manchas Solares	6
3.5 – Raios Cósmicos	8
3.5.1 – Raios Cósmicos Galácticos	8
3.5.2 – Raios Cósmicos Solares	8
3.6 – Produção de Radionuclídeos Cosmogênicos	9
3.6.1 – Intensidade de Raios Cósmicos Primários	9
3.6.2 – Modulação Solar	9
3.6.3 – Modulação Geomagnética	11
3.7 – Carbono 14 (C14)	11
3.7.1 – Efeito Suess	11
3.8 – Berílio 10 (Be10)	11
3.9 – Atividade Solar no Passado	12
3.9.1 – Modelo Matemático	13
3.9.2 – Modelo Físico-Matemático	15
4 – METODOLOGIA DE ESTUDO	18
4.1 – Séries Temporais	18
4.2 – Correlação e Regressão Linear	20
4.3 – Análise Espectral (Método de Regressão Iterativa)	22
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1 – Primeiro Método (M1)	25
5.2 – Segundo Método (M2)	29
5.3 – Terceiro Método (M3)	33
5.4 – Comparação de Resultados	37
5.4.1 – Interpretação dos Resultados	39
6 – CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	42

1 – INTRODUÇÃO

O Sol, por ser a estrela mais próxima da Terra, interfere no planeta e na vida de seus habitantes de diversas formas. A forma mais recorrente de interferência na Terra está associada à partículas, atômicas e subatômicas, que são emitidas do Sol em direção ao planeta, que se juntam às partículas oriundas do espaço interestelar. Estas partículas formam a chamada radiação cósmica, e sua interação com a atmosfera forma elementos menos comuns na superfície terrestre, como é o caso do Carbono 14 e do Berílio 10. A atividade solar pode, entre outras coisas, danificar instrumentos eletrônicos e, inclusive, influenciar no clima da Terra, o que pode causar problemas para a população. Por isso é importante estar atento aos níveis de atividade do Sol. Uma forma de saber isso é através da concentração da concentração de radionuclídeos cosmogênicos, que são modulados pela atividade solar. Este estudo visa conhecer melhor a atividade solar no passado através do uso dos isótopos cosmogênicos Carbono 14 e Berílio 10, para se obter melhor compreensão do comportamento do Sol, para que seja mais fácil descobrir como lidar com os problemas por ele causados.

Na sequência do trabalho são apresentados cinco capítulos. O capítulo 2 apresenta o objetivo, ou seja, a motivação para a execução da pesquisa. No capítulo 3 é feita a revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes à pesquisa, ou seja, é abordada a atividade solar, o campo heliomagnético, entre outros elementos decorrentes da atividade solar. Além disso, é também abordada a radiação cósmica e os radionuclídeos cosmogênicos. Por fim, o capítulo 3 faz menção ao estudo da atividade solar no passado. O capítulo 4 diz respeito à metodologia de estudo utilizada, onde mostra as séries temporais e os métodos matemáticos utilizados. No capítulo 5, temos os resultados e discussões, onde é explicado os diferentes métodos utilizados e é mostrado os resultados obtidos. O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados mostrados no capítulo 5.

2 – OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo o estudo da atividade solar no passado utilizando séries temporais da radiação cósmica secundária (Carbono 14 e Berílio 10), além do número de manchas solares (parâmetro da variabilidade solar). Para tanto, foi feito uso da análise da correlação e regressão linear, além do método de análise por regressão iterativa.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Atividade Solar

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, possuindo uma idade de aproximadamente 4,5 bilhões de anos. A distância média entre Terra e Sol, definida como uma unidade astronômica (1 U.A.), é de cerca de 150 milhões de quilômetros. Sua composição é de, aproximadamente, 90% de Hidrogênio (H), 10% de Hélio (He) e 0,1% de elementos mais pesados, tais como Carbono (C), Nitrogênio (N) e Oxigênio (O) (ECHER, et al., 2003).

Acredita-se, de acordo com Prestes (2006), que a energia gerada no Sol é devida a uma série de reações nucleares que ocorrem dentro do Sol, onde tem-se quatro átomos de hidrogênio se fundindo para formar um átomo de hélio. Porém, a emissão de energia do Sol em todas as suas formas não é constante, pois ela varia tanto no tempo quanto com a posição do Sol. Dessa forma, a atividade solar acaba tendo influência sobre a distribuição dos campos magnéticos e partículas carregadas no meio interplanetário, onde tem-se importantes consequências quanto ao estado físico da atmosfera superior da Terra e para a atividade geomagnética (PRIEST, 1987; PRESTES, 2009).

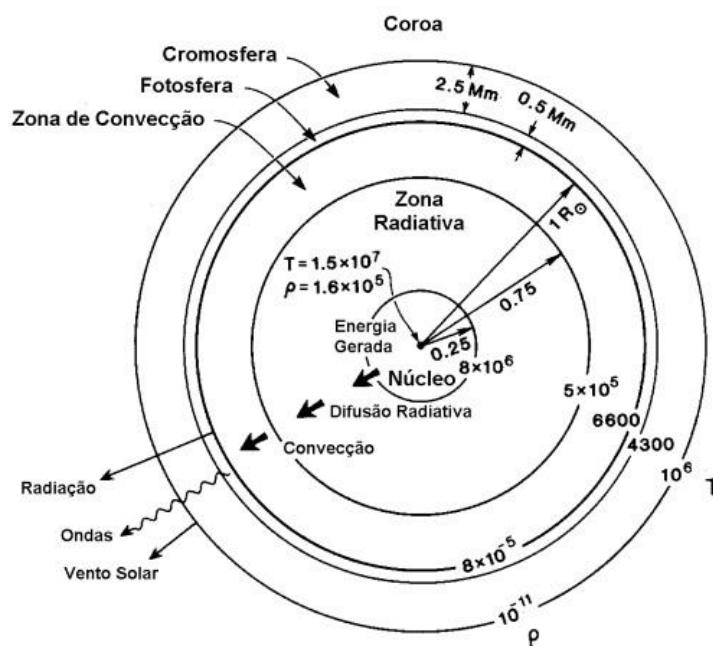


Figura 3-1: Ilustração esquemática do Sol.
Fonte: Kivelson e Russel (1995, p.61).

A estrutura interna do Sol pode ser dividida em quatro partes, núcleo, zona radioativa, zona de convecção e atmosfera solar (dividida em fotosfera, cromosfera e coroa), como mostra a Figura 3-1. Porém, é na zona de convecção que ocorrem os fenômenos mais importantes da

atividade solar. De acordo com Prestes (2009), é a zona de convecção que completa o transporte de energia e a irradiação do centro do Sol para o espaço, através da fotosfera, e para o vento solar. É ela quem coordena as escalas da estrutura do campo magnético que controla as características do vento solar. Além disso, temos que o campo magnético é formado pelo processo de dínamo na zona de convecção, sendo que é deste campo que resultam as manchas solares, as “*solar flares*”, as ejeções de massa coronal, além de outros tipos de atividade magnética, além do ciclo solar. Os ciclos solares, monitorados pelo número de manchas solares, são variações periódicas na atividade solar, com uma duração dentro de um período médio de 11 anos (PRESTES, 2009).

Quase todas as características observáveis na atmosfera solar devem sua existência ao campo magnético, ou seja, elas representam diferentes maneiras em que o plasma solar está respondendo ao desenvolvimento do campo magnético, onde temos as manchas solares como exemplo mais contundente (PRIEST, 1987; HOYT e SCHATTEN, 1997; PRESTES, 2009).

Uma característica do ciclo solar é que o tempo de aumento do mínimo para o máximo é menor do que o tempo de declínio para o mínimo (PRESTES, 2006). Além disso, como o ciclo solar é monitorado pelo número de manchas solares, dois ciclos de manchas solares são necessários para que o Sol retorne ao mesmo estado de polaridade, o que resulta em uma periodicidade de 22 anos que é conhecida como ciclo de Hale (PRIEST, 1987; PRESTES, 2009).

3.2 – Campo Heliomagnético

De acordo com Hathaway (1998), o dínamo solar é o processo pelo qual o campo magnético do Sol é gerado, através da interação do campo com a convecção e rotação. Silva (2005) diz que o campo magnético é carregado pelo vento solar, porém o campo magnético permanece unido ao Sol. Desta forma, as linhas do campo magnético solar não são paralelas à velocidade radial do vento solar. Devido à rotação do Sol, o campo magnético interplanetário tem, em larga escala, o aspecto de uma espiral de Arquimedes, como mostra a Figura 3-2, sendo quase radial próximo ao Sol e praticamente perpendicular à direção radial na distância de 5 – 10 U.A. (SILVA, 2005).

Silva (2005) também menciona que próximo à Terra (1 U.A.), o campo magnético interplanetário tem inclinação de cerca de 45° em relação à reta que liga a Terra ao Sol. É importante ressaltar que a região na qual o campo magnético interplanetário tem efeito é chamada de heliosfera, por isso a partir de agora o campo magnético interplanetário será referido como campo heliomagnético. A Figura 3-3 mostra um esquema da heliosfera e suas principais características.

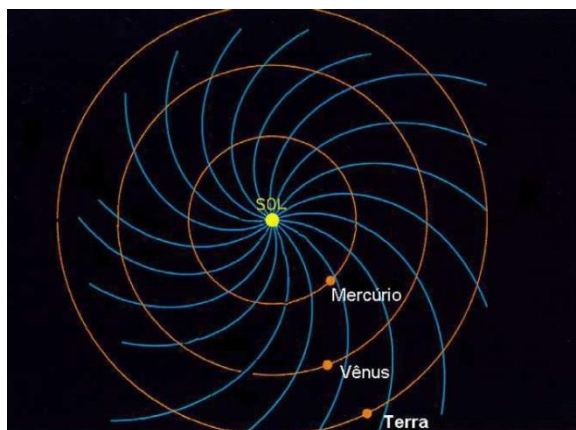


Figura 3-2: Campo magnético interplanetário como espiral de Arquimedes.
 Fonte: Silva (2005).

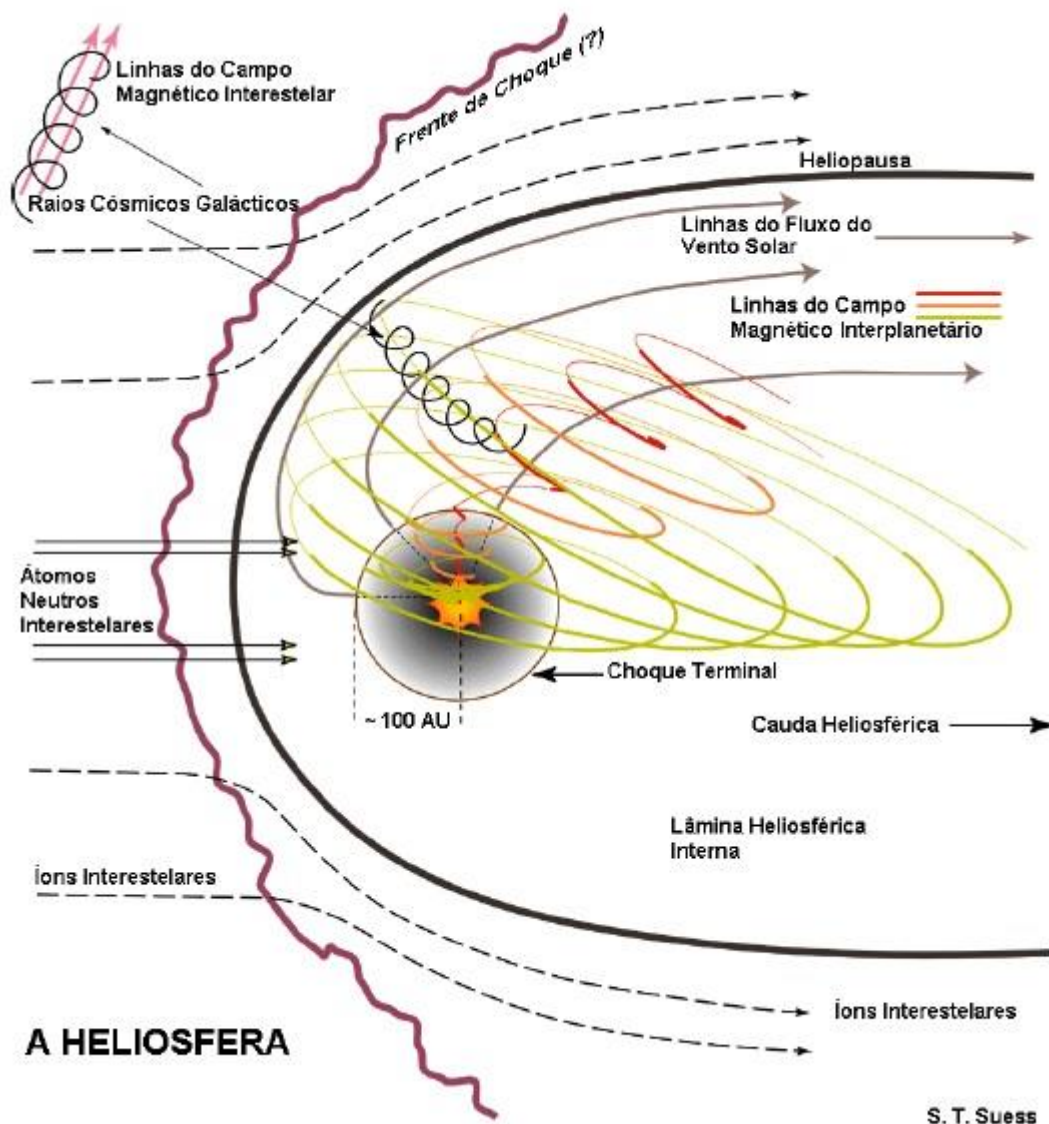


Figura 3-3: Ilustração esquemática da Heliosfera e suas principais características
 FONTE: Silva (2009).

De acordo com Hathaway (1998), observações de manchas solares e da atividade solar, desde o meio do século XVII, mostram que a atividade solar está associada aos aumentos e diminuições do campo magnético solar em um ciclo de aproximadamente 11 anos. O número de manchas solares e a área que elas cobrem crescem rapidamente do mínimo (próxima de zero) para o máximo (de 3 a 4 anos após atingirem o mínimo). Porém o declínio de máximo para mínimo é mais lento. Várias medidas da atividade solar mostram que esse crescimento e declínio assimétricos exibem variações substanciais de um ciclo para outro. Esse comportamento não-linear, e as vezes caótico, sugere que o dínamo não é apenas um fenômeno oscilatório. Ainda assim, é possível observar o ciclo solar de Hale de 22 anos que é o período médio para que o campo magnético solar volte ao mesmo estado.

3.3 – Vento Solar

O vento solar tem origem no Sol, sendo considerado como um fluxo contínuo de plasma que é repelido pelo Sol. De acordo com Tsurutani e Gonzalez (1998) à uma distância de 1 U.A., a velocidade do vento solar é de aproximadamente 400km/s e possui, aproximadamente, uma densidade de elétrons de $7 \text{ partículas/cm}^3$. O plasma é constituído primariamente por elétrons e por prótons, possuindo uma fração menor, entre 3% e 5%, de íons de Hélio (He). Este plasma está embutido em um campo magnético com intensidade de aproximadamente $5nT$ (cinco nano Tesla). Em período de máxima atividade solar, o vento solar pode atingir velocidades superiores a 600km/s podendo, ocasionalmente, atingir velocidades superiores a 1000km/s.

3.4 – Manchas Solares

De acordo com Stuvier e Quay (1980), as características mais claras da variabilidade solar são as mudanças ao longo do tempo do número de manchas solares vistas na metade visível do Sol. As manchas solares são regiões mais frias e mais escuras do que a fotosfera circunvizinha, e emitem menos energia que a fotosfera em geral porque possuem intensos campos magnéticos que bloqueiam a energia transmitida para cima pelas células de convecção na região subfotosférica (EDDY, 1976; SCHOVE, 1983; KIVELSON e RUSSEL, 1995; ECHER et al., 2003). As manchas são formadas por campos magnéticos toroidais, que são trazidos à superfície solar por efeito de empuxo (ECHER et al., 2003).

Uma mancha solar grande pode cobrir uma área de cerca de 700 vezes a área superficial da Terra, tendo $20 \times 10^6 m$ de diâmetro (HOYT e SCHATTEN, 1997). A Figura 3-4 mostra uma imagem de uma mancha solar com duas partes distintas bem visíveis, a Umbra e a Penumbra. A Umbra é a região mais escura da mancha solar e possui uma temperatura de cerca de 4100K. A Penumbra é representada pela região mais acinzentada da mancha solar e tem, em geral,

cerca de 2,5 vezes o diâmetro da Umbra. Apesar de existirem essas duas partes em algumas manchas, apenas metade das manchas solares formadas possuem Penumbra (ECHER et al., 2003). O campo magnético na Umbra é quase vertical e é mais horizontal na Penumbra.

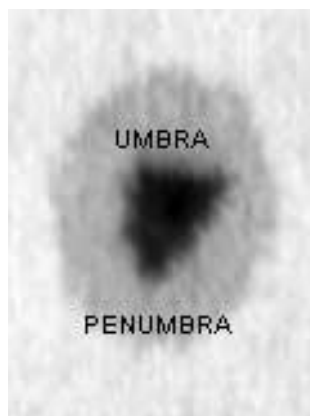


Figura 3-4: Imagem de uma mancha solar.
FONTE: Echer et al., 2003.

As manchas ocorrem em pares de polaridade magnética oposta, como mostra a Figura 3-5. A mancha mais a oeste em um determinado grupo é a mancha líder ou precedente, e as mais a leste são as manchas seguidoras. Geralmente a primeira mancha a se formar e a última a desaparecer é a mancha líder. Ela é a primeira a formar uma penumbra e a última a perde-la, além de ser a maior mancha na vida de um grupo, de acordo com Echer et al. (2003). Os grupos de mancha de um dado hemisfério solar tendem a ter líderes de mesma polaridade magnética.

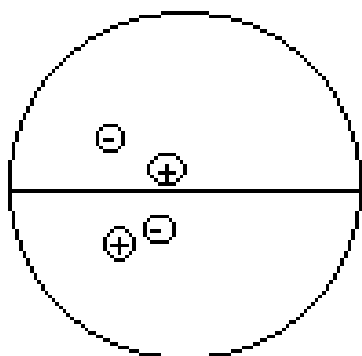


Figura 3-5: Diagrama indicando pares de manchas com polaridade oposta em ambos os hemisférios solares.

FONTE: Echer et al., 2003.

O ciclo solar de Hale tem duração de vinte e dois anos. A polaridade magnética do Sol alterna a cada onze anos, fazendo com que as manchas líderes de cada hemisfério tenham polaridade oposta em cada fase do ciclo de Hale. Próximo ao máximo solar parece não existir polaridade dominante em nenhum polo. Uma reversão da polaridade solar começa a tornar-se aparente

cerce de dois anos após o máximo solar (ECHER et al., 2003; HOYT e SCHATTEN, 1997; KIVELSON e RUSSEL, 1995).

3.5 – Raios Cósmicos

Os raios cósmicos são a principal fonte de estudo do presente trabalho. Jokipii (1998) define raios cósmicos como sendo partículas energéticas, principalmente íons, com energia cinética se estendendo de pouco mais do que energias térmicas até energias com mais de $10^{20} eV$. Os raios cósmicos bombardeiam a Terra constantemente de todas as direções, com mais de 10^{18} partículas, tendo energia superior a $1MeV$ atingindo o topo da atmosfera terrestre a cada segundo.

Acredita-se que os raios cósmicos são produzidos naturalmente em plasmas astrofísicos. De acordo com Rigozo (1994), os raios cósmicos provocam diversos tipos de reações nucleares, as quais resultam na formação de radionuclídeos cosmogênicos. Os raios cósmicos são divididos, essencialmente, em dois grupos: Raios Cósmicos Galácticos (RCG) e os Raios Cósmicos Solares (RCS).

3.5.1 – Raios Cósmicos Galácticos

Os RCG são formados fora do sistema solar (RIGOZO, 1994). Quanto ao seu processo de formação, Jokipii (1998) diz que os RCG são acelerados primariamente por ondas da explosão de uma supernova. Os raios cósmicos são então confinados na galáxia pelo campo magnético galáctico por algumas dezenas de milhões de anos.

O tempo médio de confinamento desse raio cósmico “primário” na galáxia é obtido do raio cósmico “secundário”, o qual resulta de raras colisões de raios cósmicos primários energéticos com partículas de gás interestelar. O número de raios cósmicos secundários depende da quantidade de matéria atravessada pelos raios cósmicos primários desde sua criação. Isso, por sua vez, depende da idade do raio cósmico e da densidade média de matéria onde ele se propaga. Alguns desses raios cósmicos secundários possuem núcleos instáveis que decaem com sua propagação ao redor da galáxia (Jokipii, 1998).

3.5.2 – Raios Cósmicos Solares

Os RCS são formados no Sol e possuem energia inferior a energia dos raios cósmicos galácticos. Os raios cósmicos solares variam de intensidade e de espectro de acordo com os

eventos solares. O aumento dos raios cósmicos é seguido de uma diminuição dos raios cósmicos galácticos que chegam à Terra pelo fato dos RCS chegarem à Terra por causa do vento solar.

3.6 – Produção de Radionuclídeos Cosmogênicos

Isótopos cosmogênicos são núcleos formados por reações nucleares induzidas, direta ou indiretamente, pelos raios cósmicos (RIGOZO, 1994). Parte da radiação desses nuclídeos cosmogênicos é produzida por nêutrons secundários (RAISBECK e YIOU, 1984).

Ao incidir na atmosfera da Terra, os raios cósmicos produzem radionuclídeos cosmogênicos atmosféricos. Por esta razão, a maior parte da produção de nuclídeos cosmogênicos ocorre na parte superior da atmosfera. Aproximadamente 70% acontece na estratosfera e 30% na troposfera (RIGOZO, 1994; McHARGUE e DAMON, 1991).

Porém, a produção de radionuclídeos na Terra está sujeita a três fatores variáveis, que são a intensidade de raios cósmicos primários, a modulação solar e a modulação geomagnética (RIGOZO, 1994; RAISBECK e YIOU, 1984; O'BRIEN, 1979).

3.6.1 – Intensidade de Raios Cósmicos Primários

A radiação primária dos raios cósmicos se refere ao fluxo de partículas de altas energias, a maioria composta por prótons (~90%), partículas alfa (~10%) e núcleos pesados (cerca de 1%), que chegam ao sistema solar oriundos do espaço interestelar (RIGOZO, 1994).

A origem dessas partículas é, em partes, desconhecida, mas a maioria das numerosas teorias sobre seus processos de aceleração estão associadas às supernovas remanescentes. Algumas dessas teorias permitem prever que os fluxos de raios cósmicos que encontram o sistema solar mostram variações com o tempo. Acredita-se que essas variações sejam devidas, principalmente, à sua origem e às influências do meio interestelar, que são desconhecidas (RAISBECK e YIOU, 1984; RIGOZO, 1994).

3.6.2 – Modulação Solar

O vento solar tende a repelir os raios cósmicos galácticos para fora da heliosfera, por causa do seu campo magnético, causando mudanças no espectro de energia dos raios cósmicos que

alcançam a órbita da Terra, este fenômeno é chamado de Modulação Solar (STUVIER e BRAZIUNAS, 1989; RIGOZO, 1994).

Esta modulação é mais intensa no máximo do ciclo solar de 11 anos, quando a atividade do Sol é máxima. Assim, a magnitude dessa modulação está relacionada à atividade solar, que por sua vez pode ser medida pelo número de manchas solares. Como resultado desta modulação, tem-se a redução no fluxo de raios cósmicos na região de produção dos cosmonuclídeos atmosféricos tornando-se aproximadamente 30% menor durante o máximo do ciclo solar (BEER et al., 1984; RIGOZO, 1994).

A relação inversa entre o número de manchas solares e a contagem de neutrons da radiação cósmica que chegam à Terra obtida por Inceoglu et al. (2014) é mostrada na Figura 3-6. Nesta figura, tem-se que os picos das manchas solares estão relacionados com os vales dos neutrons, e vice-versa. Além disso, a relação de alternância entre picos e vales é de cerca de 11 anos. Isso ocorre por causa do ciclo solar que em aproximadamente 11 anos alterna entre períodos de máximo e mínimo, o que reflete diretamente no número de manchas solares.

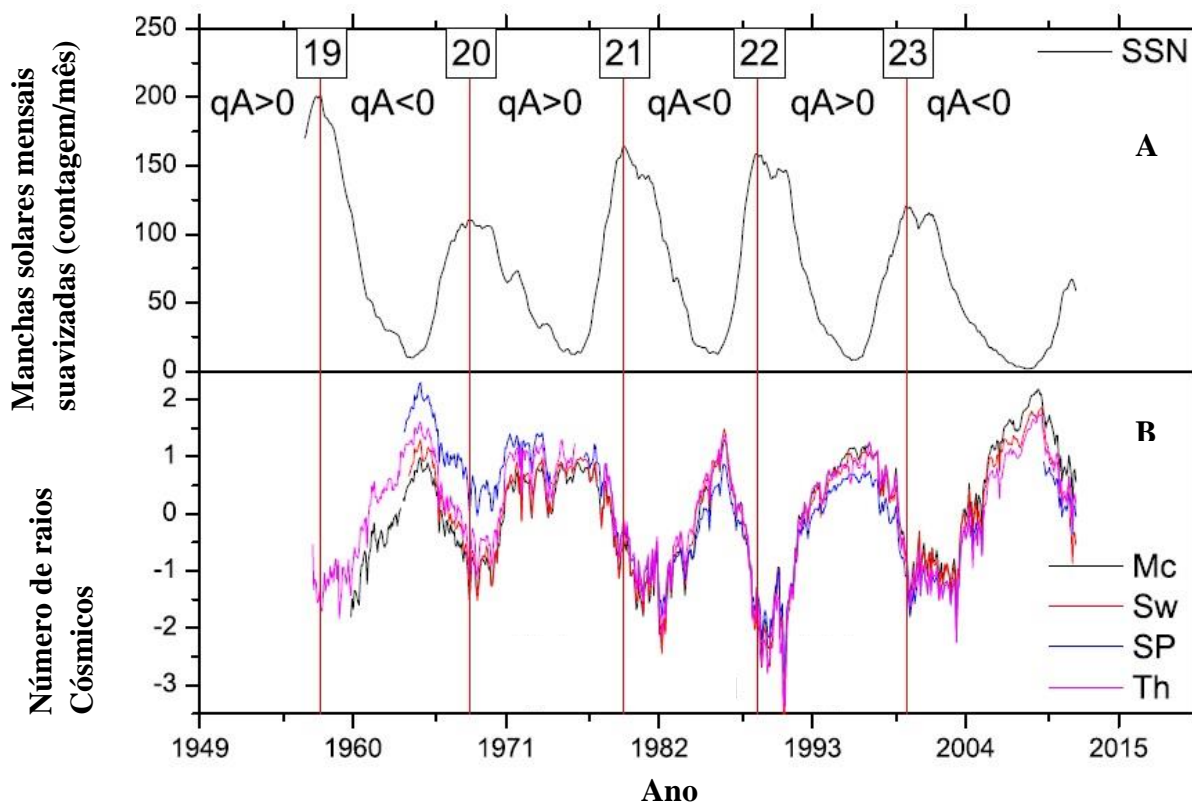


Figura 3-6: Em A temos o número de manchas solares. Em B, temos os registros pelos detectores de neutrons. Mc, Sw, SP e Th denotam, respectivamente, os monitor de neutrons de Murdo, Swarthmore, Polo Sul e Thule.

FONTE: Adaptado de Inceoglu et al., 2014.

3.6.3 – Modulação Geomagnética

Devido ao fato de os raios cósmicos serem partículas eletricamente carregadas, eles sofrem desvios devido à presença do campo magnético terrestre. O vento solar contribui com a diminuição do fluxo de raios cósmicos na Terra pela compressão das linhas de força e intensificação do campo geomagnético, e com isso dificulta a entrada dos raios cósmicos (RIGOZO, 1994). Pelo fato de o campo geomagnético se assemelhar ao campo de um dipolo, a produção de cosmonuclídeos é mais intensa próxima dos polos e menos intensa próxima do equador (HAYMES, 1971).

3.7 – Carbono 14 (C14)

O cosmonuclídeo atmosférico Carbono 14 é produzido por raios cósmico galácticos de média energia chocando-se constantemente no topo da atmosfera. São os nêutrons secundários dos raios cósmicos galácticos que formam o Carbono 14. (RIGOZO, 1994). A reação de formação do Carbono 14 é dada pela fórmula:



De acordo com Rigozo (1994) a razão do C14 no topo da atmosfera varia em função do tempo, por causa da modulação do fluxo de raios cósmicos galácticos pelas interações magnéticas do vento solar. Há um quarto elemento que influencia na variação do C14 na atmosfera, esse é o efeito Suess.

3.7.1 – Efeito Suess

A partir do ano de 1950 houveram muitas explosões termonucleares que geraram a produção artificial de C14 em quantidades elevadas. Além disso, após o início da revolução industrial, houve a produção atmosférica de dióxido de carbono industrial, que está em estado crescente. Toda essa produção de dióxido de carbono faz com que haja a diluição do dióxido de carbono radioativo na atmosfera (RIGOZO, 1994), esse é o chamado efeito Suess.

3.8 – Berílio 10 (Be10)

A produção de Be10 é devida, principalmente, ao espalhamento nuclear do oxigênio e nitrogênio, induzido por nêutrons secundários formados pela interação dos raios cósmicos

galácticos com a atmosfera terrestre. O Be10 é produzido primeiramente na estratosfera e na troposfera: aproximadamente 70% da produção de cosmonúclídeos atmosféricos ocorre na estratosfera e cerca de 30% da produção é feita na troposfera (McHARGUE e DAMON, 1991; RIGOZO, 1994). A reação de formação do berílio 10 é dada pela equação 3.2.



O Be10 difere do C14 por alguns aspectos-chave como a sua meia-vida ser mais longa e seu curto tempo de residência no reservatório de troca com a atmosfera, permitindo seu uso como monitor de processos de curto período (MORRIS, 1991; RIGOZO, 1994).

O Be10 chega à superfície da Terra primeiramente por precipitação, sendo transportado à Terra pela água da chuva na qual ele se incorpora no processo de condensação nas nuvens. O Be10 não é depositado na Terra somente pelas chuvas, mas também pela neve das montanhas e regiões polares (McHARGUE e DAMON, 1991; RIGOZO, 1994).

3.9 – Atividade Solar no Passado

A atividade solar é de extrema importância, tanto no presente quanto no passado e futuro. É necessário que existam formas de se diferenciar os principais períodos de atividade solar para que possamos compará-los com outros a fim de melhor visualizarmos semelhanças e diferenças entre eles. Apesar da atividade solar ser cíclica, como no caso dos ciclo de Hale de 22 anos, não temos os períodos de atividade iguais, pois o comportamento varia, sendo a variação da atividade um valor médio.

Assim, certos períodos importantes de atividade solar foram nomeados para que possamos utilizá-los como base de comparação, esses períodos são denominados mínimo de Oort, máximo Medieval, mínimo de Wolf, mínimo de Spörer, mínimo de Maunder, mínimo de Dalton e máximo Moderno. De acordo com Bard et al. (1997), o período de tempo entre 950 e 1900 D.C. é caracterizado por cinco máximos de produção de cosmonúclídeos, ou seja, períodos de mínima atividade solar. Bard et al. (1997) centra esses eventos nos anos de 1060, 1320, 1500, 1690 e 1820 D.C., porém ele não dá nome a esses eventos. Rigozo et al. (2001) encontra períodos semelhantes aos de Bard et al. (1997), além de encontrar dois períodos de máximo, o que dá confiabilidade aos resultados de ambos. Os períodos encontrados por Rigozo et al. (2001) foram 1090-1140 (Oort), 1140-1200 (Medieval), 1300-1386 (Wolf), 1410-1515 (Spörer), 1641-1715 (Maunder), 1790-1825 (Dalton) e 1900-1999 (Moderno). A Figura 3-7 mostra o ciclo solar com os períodos de Wolf, Spörer e Maunder em destaque, feito por Stuvier e Quay (1980) através dos dados da produção ^{14}C atmosférico.

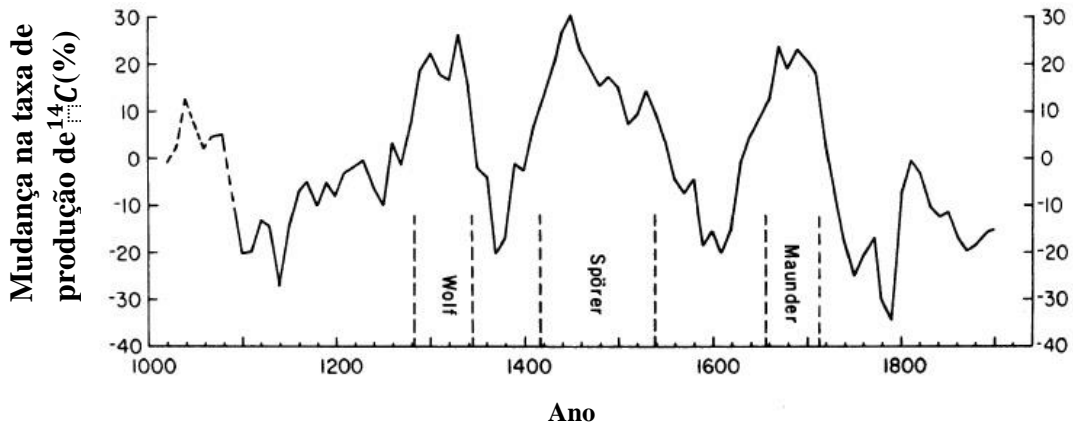


Figura 3-7: Série temporal da produção de carbono 14.
 FONTE: Adaptado de Stuvier e Quay, 1980.

3.9.1 – Modelo Matemático

Em seu trabalho, Rigozo et al. (2001) apresenta uma reconstrução do número de manchas solares de Wolf, também conhecido como número de manchas solares Internacional ou de Zürich R_z . Essa reconstrução é feita usando o modelo matemático de Análise Espectral. Para uma análise espectral clássica, uma série temporal quase estacionária e quase periódica pode ser representada por uma soma de funções seno para n períodos (Rigozo et al., 2001), ou seja:

$$f(t) = \sum_1^n r_n \text{sen} \left(2\pi \frac{t}{T_n} + \phi_n \right) \quad (3.1)$$

onde r_n é a amplitude da n -ésima frequência, t é a variável independente da função, n é o maior número a ser somado, T_n é a periodicidade e ϕ_n é a fase.

A Figura 3-8 traz as médias anuais do número de manchas solares de Wolf (R_z) e do número do grupo de manchas solares (R_G) obtidos por Rigozo et al. (2001), além dos espectros obtidos pelo programa ARIST, descrito por Rigozo (1994). Os espectros mostrados na Figura 8 são referentes aos períodos com nível de confiança de 95%, ou seja, são intervalos que possuem uma amplitude duas vezes maior que seu desvio padrão.

Usando os resultados obtidos pelo ARIST (mostrados na Figura 3-8) Rigozo et al. (2001) recria o sinal das manchas solares, usando a equação 3.1, apenas para os valores com confiabilidade de 95%. Desta forma, o método matemático da análise espectral gera uma nova função para o número de manchas solares, função esta que representa com maior confiabilidade os valores em cada ponto. A Figura 3-9 mostra a comparação de resultados obtida por Rigozo et al. (2001) entre a série original do número de manchas solares e a série reconstruída através do modelo de análise espectral.

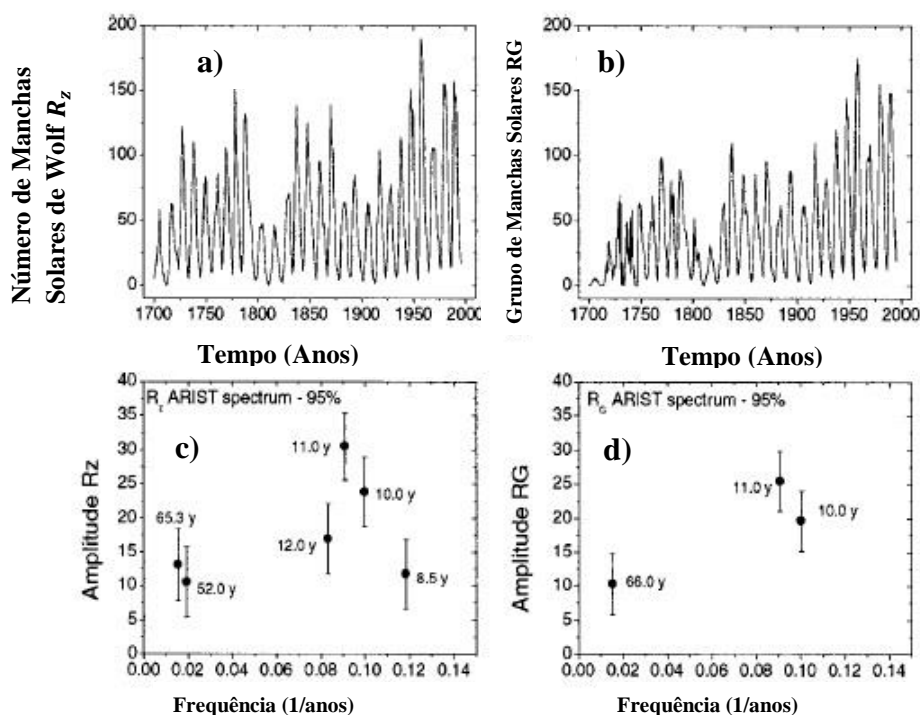


Figura 3-8: a) média anual do número de manchas solares de Wolf; b) média anual do número de grupo de manchas solares; c) espectro do R_z pelo ARIST; d) espectro do R_G pelo ARIST.

FONTE: Adaptado de Rigozo et al., 2001.

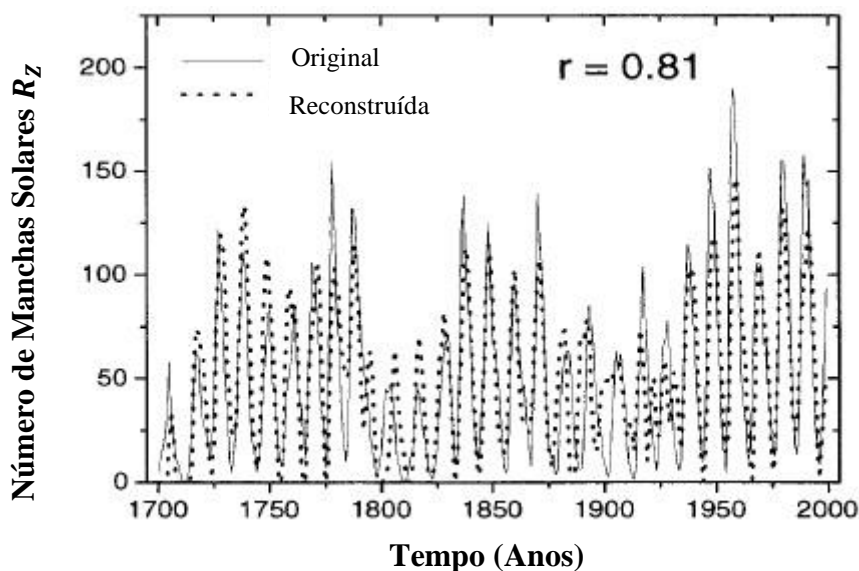


Figura 3-9: Comparação entre série reconstruída e série original do número de manchas solares.

FONTE: Adaptado de Rigozo, 2001.

A Figura 3-10 mostra a reconstrução obtida por Rigozo et al. (2001) para o período entre 1000-1999 D.C., onde está em evidência os principais períodos de atividade solar desse intervalo temporal.

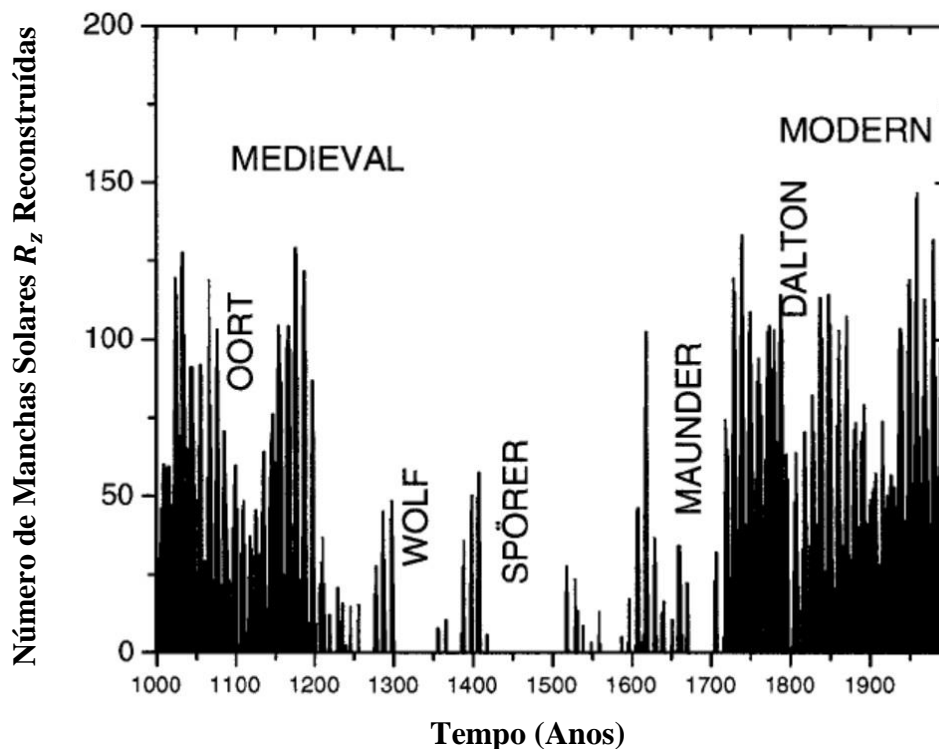


Figura 3-10: Reconstrução da atividade solar no período de 1000-1999.
 FONTE: Adaptado de Rigozo et al., 2001.

No presente trabalho é utilizado o mesmo modelo matemático que foi utilizado por Rigozo et al. (2001), e também é utilizado o programa ARIST, desenvolvido por Rigozo (1994), que é baseado no método de análise espectral. Os princípios matemáticos da análise espectral são descritos detalhadamente na seção 4.3 .

3.9.2 – Modelo Físico-Matemático

Miletsky et al. (2004) utilizou séries temporais de observações de auroras e manchas solares, além de séries de concentração dos isótopos cosmogênicos ^{14}C e ^{10}Be para reconstruir a atividade solar desde 850 A.D.. Miletsky et al. (2004) construiu uma série de modelos indutivos lineares e não-lineares, onde cada um está em acordo com os outros e reproduz a atividade solar global extrema. A Figura 3-11 mostra os resultados obtidos por Miletsky et al. (2004).

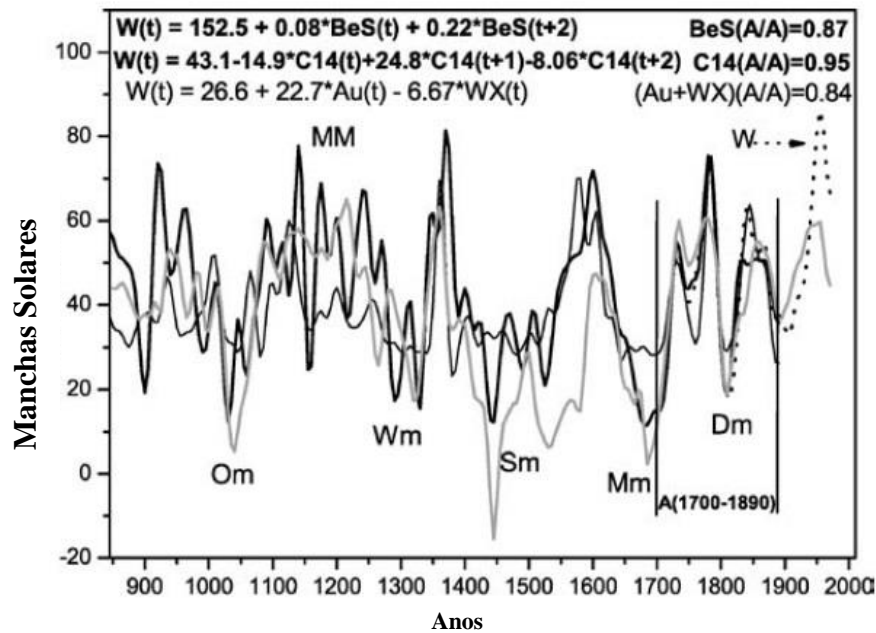


Figura 3-11: Reconstruções do número de manchas solares de Wolf (curva pontilhada) desde 850 pelo modelo "curto" (A). A curva preta grossa é referente à série de carbono 14 (C14), a curva cinza se refere à série de berílio 10 (BeS) e a curva preta fina é referente série de Auroras (Au+WX).

FONTE: Adaptado de Miletsky et al., 2004.

Para chegar nas reconstruções mostradas na Figura 3-11, Miletsky et al. (2004) escolheu entre as séries de referência do número de manchas solares entre o número de manchas solares de Wolf (WSN) e o Grupo de manchas solares (GSN). O processo foi iniciado interpolando as séries com a utilização de um passo de tempo de um ano, e subtraiu a tendência de longo prazo da componente do ^{14}C . Em seguida ele normalizou a série das auroras (Au) dividindo-a por uma média corrida de 200 anos. Após isso, as séries foram processadas por uma média corrida de 13 anos com pesos harmônicos. Para poder decidir entre as duas séries, foi feita uma suavização para a média anual da série de área das manchas solares (SA) e para o índice de atividade geomagnética (AA). O próximo passo de Miletsky et al. (2004) foi reduzir as séries SA e AA para a escala de GSN por regressão linear.

Para a reconstrução Miletsky et al. (2004) fez uso do método “*Inductive Self-organizing Modelling*” (ISM) (FARLOW, 1984; MADALA e IVAKHNENKO, 1994), que permite a obtenção de modelos de complexidade ideal.

Solanki et al. (2004) gerou uma reconstrução do número de manchas solares cobrindo 11400 anos, baseado em datação de androcronológica de carbono radioativo. No trabalho foram combinados modelos físicos para cada processo que conectava concentrações de carbono radioativo com o número de manchas solares. Solanki et al. (2004) descobriu durante seu trabalho que durante os passados 11400 anos o Sol possuía apenas 10% do seu tempo com alto nível de atividade magnética, e que quase todos os períodos passados de alta atividade eram mais curtos que os períodos atuais. A Figura 3-12 mostra a reconstrução das manchas solares obtidas por Solanki et al. (2004).

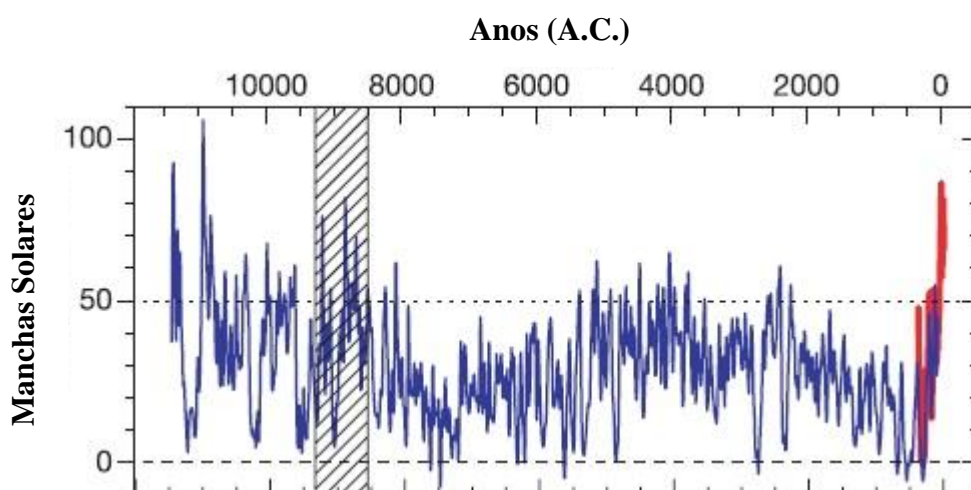


Figura 3-12: Média de 10 anos das manchas solares reconstruídas a partir dos dados de variação de carbono 14 desde 9500 A.C. (curva azul) e média de 10 anos do grupo de manchas solares (GSN) obtidos de observações de telescópios desde 1610 (curva vermelha).

FONTE: Adaptado de Solanki et al, 2004.

Uma abordagem física para a reconstrução de manchas solares no passado é baseada em procura de dados, assim como concentrações de isótopos cosmogênicos. Estas abordagens recentemente tem sido fortificadas pelo desenvolvimento de modelos físicos que descrevem cada ligação da corrente de processos, conectando a concentração de isótopos cosmogênicos com o número de manchas solares (SOLANKI et al., 2004).

Para a obtenção dos resultados descritos na Figura 12, Solanki et al. (2004) determinou a taxa de produção de ^{14}C na atmosfera da Terra de acordo com Usoskin e Kromer (2005). Foram utilizados dois métodos distintos, os quais levavam em consideração os efeitos dos ciclos de carbono em diferentes meios. Para a reconstrução, Solanki et al. (2004) usou a média da taxa de produção de ^{14}C utilizando as duas técnicas.

Da taxa de produção do ^{14}C , os autores obtiveram o número de manchas solares em múltiplos passos, cada um substanciado por um modelo físico. O modelo que descreve o transporte e modulação dos raios cósmicos galácticos dentro da heliosfera é invertido para que se possa encontrar o fluxo de raios cósmicos correspondente à determinada taxa de produção de ^{14}C .

4 – METODOLOGIA DE ESTUDO

4.1 – Séries Temporais

No estudo são utilizadas três séries temporais diferentes, onde uma está relacionada à variabilidade solar e as outras duas estão relacionadas à radiação cósmica. A série temporal relacionada à variabilidade solar é a média anual do número de manchas solares, disponível pelo “*Solar Influences Data Analysis Center*” (SIDC) através do seu site (<http://sidc.oma.be/sunspot-data/>). Na Figura 4-1 temos o gráfico gerado a partir dos dados fornecidos pelo SIDC.

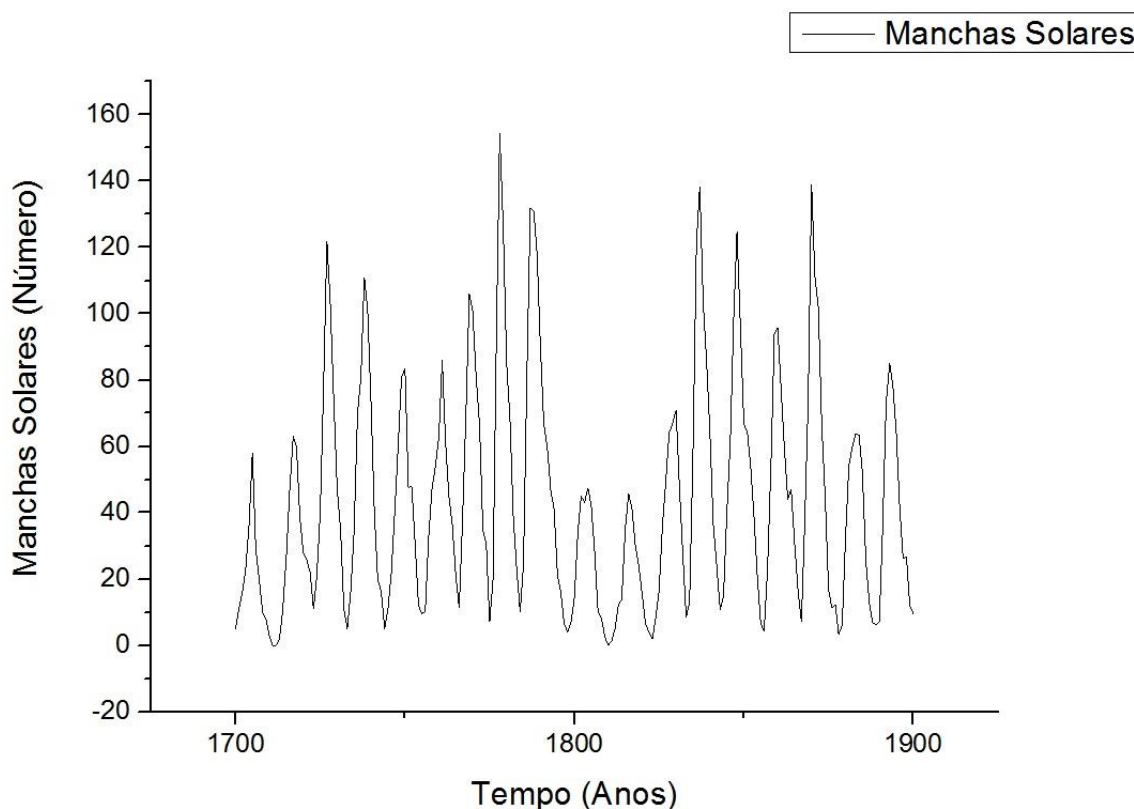


Figura 4-1 Gráfico do número de manchas solares em resolução anual.

Os elementos representativos da radiação cósmica utilizados no trabalho são a razão de produção do C14 e a concentração de Be10 em testemunhos de gelo no Polo Sul da Antártica. Os dados de C14 foram retirados do trabalho de Stuvier e Quay de 1980, intitulado “*Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun*”. Os dados da concentração de Be10 utilizados são referentes ao trabalho de McHargue e Damon de 1991, intitulado “*The global beryllium 10 cycle*”. As Figuras 4-2 e 4-3 representam, respectivamente, os gráficos gerados para a produção de C14 e a concentração de Be10.

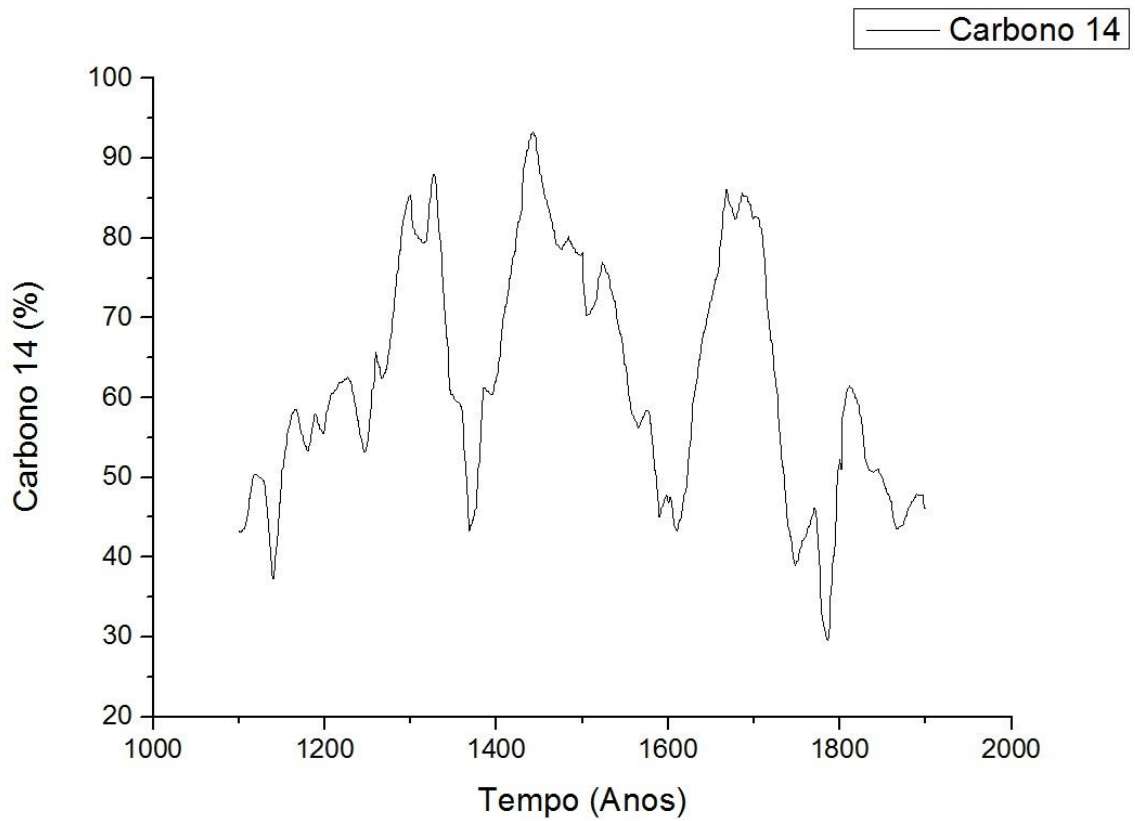


Figura 4-2: Série Temporal da razão de produção de C14.
 FONTE: STUVIER e QUAY (1980), p.15.

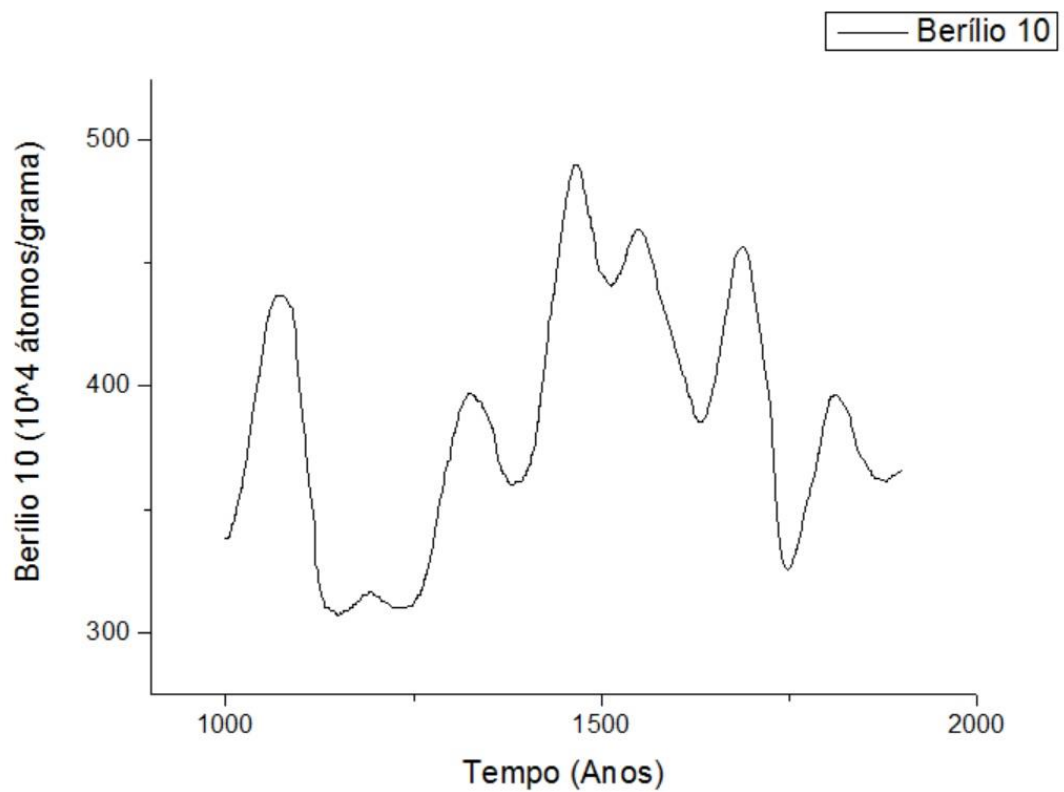


Figura 4-3: Concentração de Be10 em testemunho de gelo no Polo Sul da Antártica.
 FONTE: McHARGUE e DAMON (1991), p.144.

Portanto, são utilizadas as séries temporais descritas pelas Figuras 4-2 e 4-3 para a relação com a radiação cósmica. Quanto à variabilidade solar os dados da Figura 4-1 são modificados pois, como não estamos interessados no número de manchas solares, e sim no comportamento da atividade solar, podemos, para ter uma melhor compreensão do comportamento, desviar os dados em uma média de 22 anos (referente ao ciclo solar de Hale). A Figura 4-4 mostra os dados das manchas solares na média corrida de 22 anos.

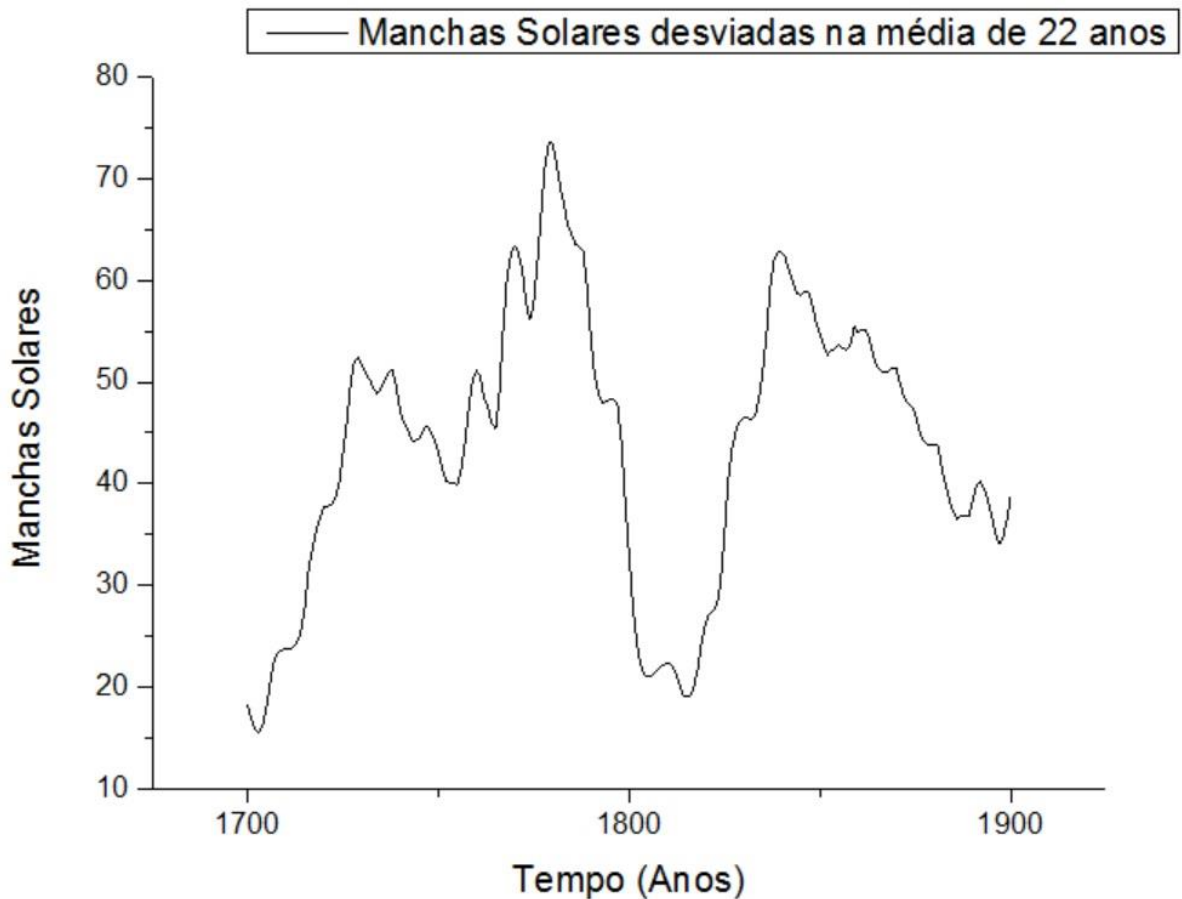


Figura 4-4: Manchas Solares – Média corrida de 22 anos.

4.2 – Correlação e Regressão Linear

De acordo com Jenkins e Watt (1968), Benvington (1969), Costa Neto (1977), Hardin (1986) e Prestes (2009), definimos o processo de correlação e regressão linear da seguinte maneira: Considerando a existência de medidas de pares de quantidade x_i e y_i , procuramos saber se existe alguma relação matemática entre as variáveis x e y , ou seja, se existe alguma correlação nas variações dos valores de y , com variações nos valores de x . A correlação expressa o grau de relação entre as duas variáveis, ou seja, mostra a tendência da variação conjunta das duas variáveis consideradas. Além disso, devemos considerar a intensidade (ou

grau) da correlação. O grau de correlação linear pode ser calculado pelo coeficiente r , representado na Equação 4.1, onde \bar{x} e \bar{y} são os valores médios das respectivas variáveis x e y .

$$r(n) \equiv \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

Esse coeficiente é adimensional, podendo variar entre +1 e -1, onde o valor +1 mostra uma correlação perfeita e -1 uma anticorrelação perfeita. Um valor zero indica que não houve correlação. Uma correlação significativa indica que pode existir uma relação de causa-e-efeito entre as variáveis, porém não indica a relação direta entre x e y , mas indica que existe uma tendência quanto à variação conjunta. Um sinal negativo indica uma relação inversa entre as variáveis, isto é, enquanto uma cresce a outra decresce. Já uma correlação positiva indica que as variáveis x e y crescem e decrescem juntas. Mas o fato das duas variáveis tenderem a aumentar ou diminuir juntas não implica que uma tenha qualquer tipo de efeito, direto ou indireto, sobre a outra. Apesar disso, elas podem ser influenciadas por outras variáveis, de forma a aumentar ou diminuir fortemente a relação matemática. É necessário acrescentar também que os coeficientes de correlação devem ser tratados com muita cautela, já que eles servem como indicadores de relação entre pares variáveis.

As variáveis envolvidas nesse trabalho (Carbono 14, Berílio 10 e Manchas Solares) são tratadas por regressão. Como se trata de regressão linear, o ajuste a ser utilizado deve ser um ajuste linear através dos pontos que representam as variáveis dependente e independente. Supõe-se que a linha teórica da regressão seja uma reta e que seja necessário estabelecer a regressão de y em função de x , temos que a equação da reta é da forma mostrada pela Equação 4.2.

$$y = \alpha + \beta x \quad (4.2)$$

Os valores de α e β da reta teórica são estimados através dos pontos experimentais que são fornecidos pela amostra. A partir disso, será obtida uma reta estimada, cuja equação é dada por:

$$\hat{y} = a + bx \quad (4.3)$$

Onde, na Equação 4.3, a é a estimativa para o parâmetro α , e b (chamado de coeficiente de regressão linear) é a estimativa para o parâmetro β . Os parâmetros a e b são coeficientes obtidos pelo melhor ajuste.

4.3 – Análise Espectral (Método de Regressão Iterativa)

O método de regressão iterativa está escrito em sua forma geral em Wolberg (1967), Nordemann (1992) e Rigozo (1994). Este método foi escolhido pois ele é bem sucedido na busca de periodicidades em séries temporais, além de poder ser aplicado ao ajuste de qualquer função (RIGOZO e NORDEMANN, 1999). Ele é utilizado nesse trabalho para procurar periodicidades em séries temporais utilizando uma única função senoidal com três parâmetros desconhecidos: a_0 (amplitude), a_1 (frequência) e a_2 (fase da função). O método é iniciado pela definição da função condicional descrita na Equação 4.4.

$$F = Y - a_0 \text{sen}(a_1 t + a_2) \quad (4.4)$$

Na Equação 4.4 Y é o sinal medido, t é o tempo e a_0 , a_1 e a_2 são os parâmetros desconhecidos.

Por se tratar de um método iterativo, a cada iteração devem ser calculados termos corretivos A_0 , A_1 e A_2 que são aplicados, respectivamente, aos parâmetros a_0 , a_1 e a_2 . Esses termos corretivos são uma representação das soluções do sistema:

$$A = C^{-1}V \quad (4.5)$$

Na Equação 4.5 os termos C_{ij} e V_i das matrizes C e V são os somatórios para todos os pontos experimentais dos valores de cada iteração. Podemos calcular esses termos diretamente pelas expressões 4.6 e 4.7.

$$C_{ij} = \frac{\left(\frac{dF}{da_i}\right)\left(\frac{dF}{da_j}\right)}{L} \quad (4.6)$$

$$V_i = \frac{\left(\frac{dF}{da_i}\right)F}{L} \quad (4.7)$$

Nas Equações 4.6 e 4.7, L é o coeficiente de ponderação e é descrito pela equação 4.8.

$$L = D_y^2 + \left(\frac{dF}{dt}\right)^2 D_t^2 \quad (4.8)$$

Na Equação 4.8, D_y e D_t representam o desvio padrão associado, respectivamente, a Y e t . Podemos aplicar os termos corretivos A_0 , A_1 e A_2 aos parâmetros a_0 , a_1 e a_2 da seguinte forma:

$$\begin{aligned} a_0 &= a_{0_0} - A_0; \\ a_1 &= a_{1_0} - A_1; \\ a_2 &= a_{2_0} - A_2; \end{aligned} \quad (4.9)$$

Os parâmetros a_{0_0} , a_{1_0} e a_{2_0} são os valores iniciais da primeira iteração. Como os valores podem ser arbitrariamente escolhidos, é preferível escolher valores iniciais de mesma ordem de grandeza que os valores esperados para que se possa diminuir o tempo de cálculo.

Para a obtenção dos valores dos parâmetros a_i é necessário que seja respeitado um critério de convergência. As iterações deverão ser realizadas até o momento em que o somatório dos quadrados dos valores de A_i fiquem abaixo de um dado valor. Quando esse critério for obtido, os valores dos parâmetros a_i são os considerados como sendo as melhores estimativas, e podemos expressar seus desvios padrões como sendo:

$$D_{a_i} = \frac{\sqrt{C_{kk}^{-1}S}}{\sqrt{n-p}} \quad (4.10)$$

Em 4.10 tem-se que C_{kk} é o termo diagonal da matriz C^{-1} , n é o número de dados experimentais, p é o número de parâmetros desconhecidos e S é o somatório dos quadrados dos resíduos F e ponderados pelos coeficientes L :

$$S = \frac{F^2}{L} \quad (4.11)$$

Deve-se então procurar os valores dos parâmetros da função senoidal, fazendo-se uma varredura dos valores de frequência angular. Tem-se que a variação da frequência angular é de:

$$d\omega = \frac{2\pi}{t_{max}} \quad (4.12)$$

onde, na Equação 4.12,

$$t_{max} = t_{inicial} - t_{final} \quad (4.13)$$

Dessa forma, a frequência angular máxima é de:

$$\omega_{max} = d\omega \frac{N}{2} \quad (4.14)$$

Na Equação 4.14, N é o número de dados.

Essa frequência angular máxima corresponde à frequência permitida, que é chamada de frequência de Nyquist, e é expressa por:

$$\omega_n = \frac{\pi}{\Delta t} \text{ ou } f_n = \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.15)$$

Na Equação 4.15 Δt é o intervalo de amostragem (RIGOZO e NODERMANN, 1999).

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

No estudo é utilizada uma série temporal de concentração de ^{14}C , que tem variação temporal de 1100 – 1900 A.D., uma série temporal da concentração de ^{10}Be , com variação temporal de 1000 – 1900 A.D., e uma série temporal da média corrida de 22 anos das manchas solares, com variação temporal de 1700 – 1900 A.D.. Essa média corrida de 22 anos das manchas solares é necessária pois considera o período médio de tempo necessário para que o dínamo solar volte ao seu estado original, ou seja, para que tenhamos um ciclo de Hale completo.

A manipulação dos dados foi feita para que fosse possível realizar a reconstrução dos dados em períodos de tempo no passado. Por causa disto, o estudo foi dividido em três métodos, os quais fornecem uma nova reconstrução solar para cada conjunto de dados. Dos métodos utilizados, um utiliza a metodologia de correlação e regressão linear descrita na seção 4.2, os outros dois métodos utilizam a análise espectral que é descrita na seção 4.3.

5.1 – Primeiro Método (M1)

Assim como fez Miletsky et al. (2004), é necessário escolher um período de tempo como referência, por causa da diferença no intervalo de tempo de cada série. Dessa forma, escolhemos o período de 1700 – 1900 A.D., o período de tempo da série temporal da média corrida de 22 anos das manchas solares, como intervalo de referência. Desta forma, foram geradas as Figuras 5-1 e 5-2, que mostram os valores das séries de ^{14}C e ^{10}Be para o tempo de referência.

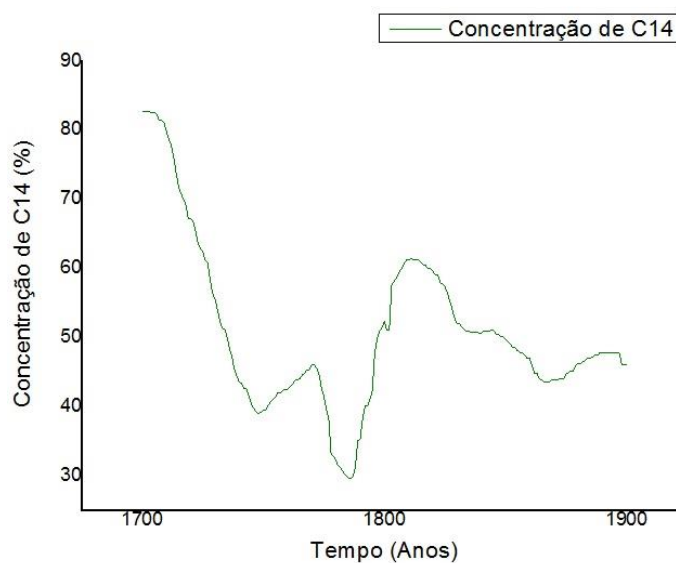


Figura 5-1: Gráfico C14 no intervalo de Referência.

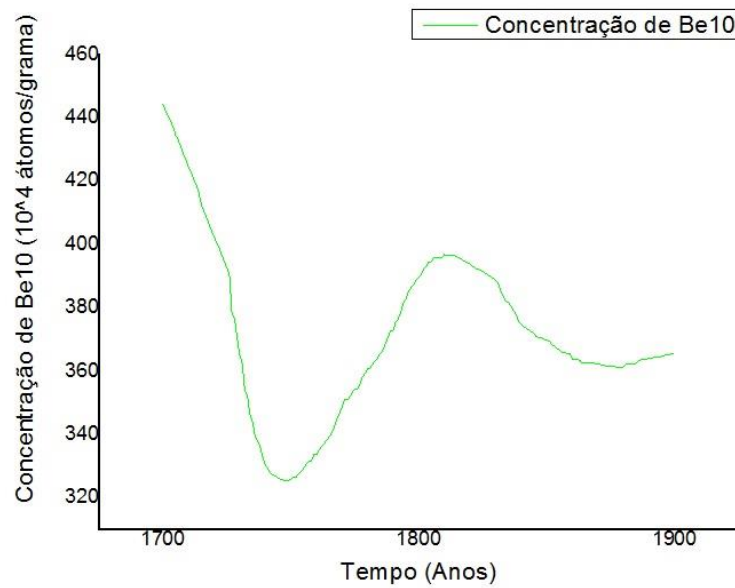


Figura 5-2: Gráfico Be10 no intervalo de Referência.

De posse das séries temporais com o mesmo intervalo de tempo, o próximo passo foi fazer a correlação linear entre as séries de carbono e berílio com a série da média corrida de 22 anos das manchas solares. A correlação entre a média corrida de 22 anos com a série de carbono gerou uma correlação com $r = -0,74$. Enquanto que a correlação da média corrida das manchas solares com a série do berílio gerou uma correlação com $r = -0,6$. Esses resultados mostram que as séries dos isótopos cosmogênicos ^{14}C e ^{10}Be estão em anticorrelação com a série da média corrida de 22 anos das manchas solares. As Figuras 5-3 e 5-4 mostram a reta de correlação para os dois casos.

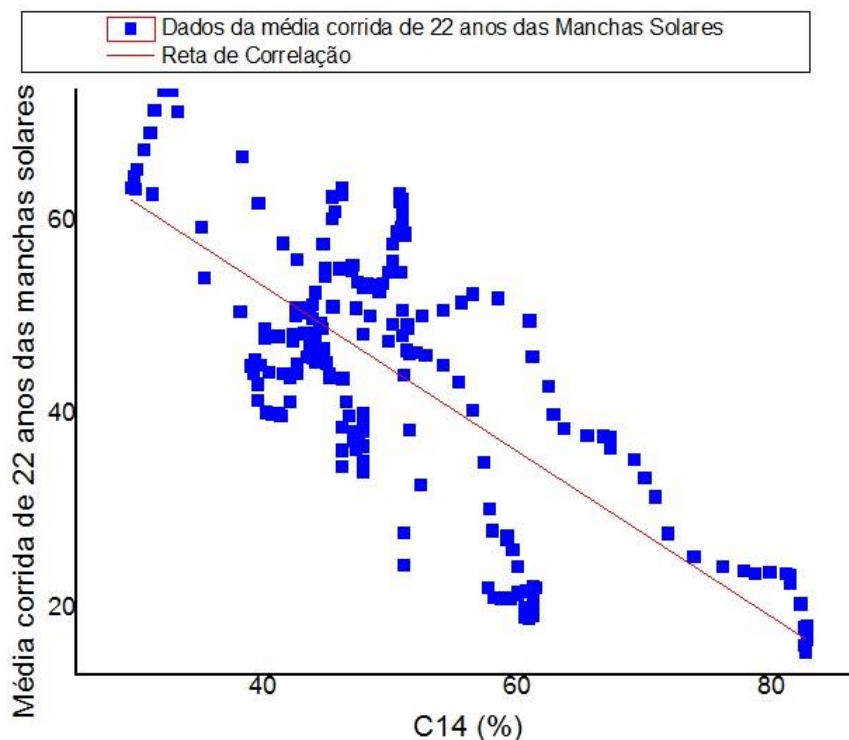


Figura 5-3: Reta de Correlação entre Média corrida de 22 anos das manchas solares e C14.

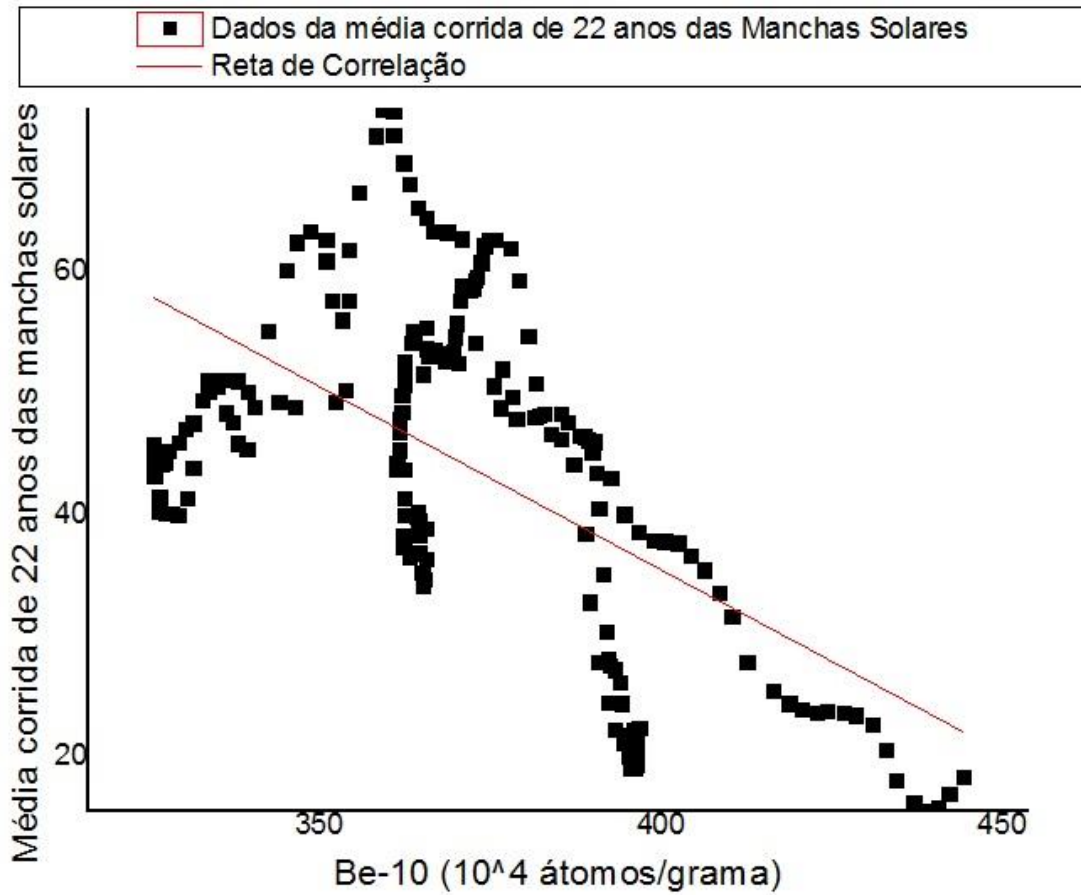


Figura 5-4: Reta de correlação entre a média corrida de 22 anos das manchas solares e o Be10.

Após a obtenção das retas de regressão, foram calculadas as equações das retas, onde as manchas solares foram utilizadas como variável dependente (y) e os isótopos cosmogênicos foram utilizados como variáveis independentes (x). As equações 5.1 e 5.2 representam, respectivamente, as equações das retas para o ^{14}C e o ^{10}Be .

$$y = 87,44688 - 0,85464x \quad (5.1)$$

$$y = 156,61483 - 0,303x \quad (5.2)$$

Com as equações das retas, foi possível fazer a reconstrução da atividade solar. Primeiramente, foram recuperadas as séries temporais completas do ^{14}C e ^{10}Be que foram mostradas nas Figuras 14 e 15 respectivamente. Após isso foi possível substituir os valores numéricos do ^{14}C na equação 5.1 e do ^{10}Be na equação 5.2. Assim é obtido os valores das reconstruções da atividade solar a partir de 1100 A.D. para o ^{14}C e a partir de 1000 A.D. para o ^{10}Be . As Figuras 5-5 e 5-6 mostram a reconstrução da atividade solar para o ^{14}C e ^{10}Be , respectivamente.

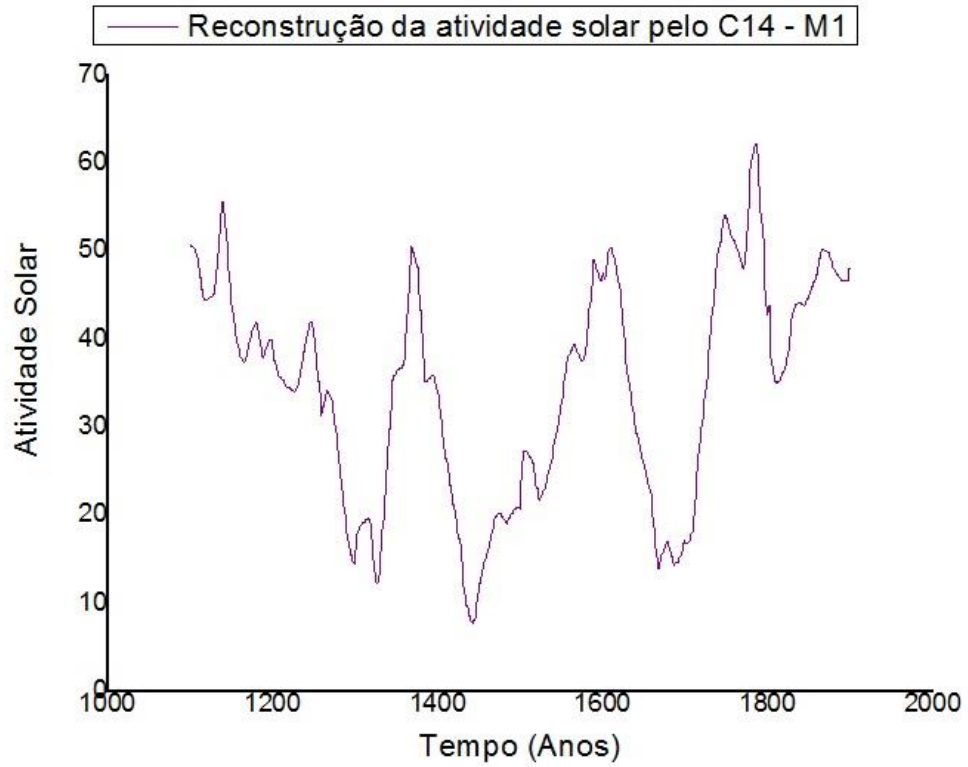


Figura 5-5: Reconstrução da atividade média corrida de 22 anos das manchas solares entre 1100-1900 pelo C14 - M1.

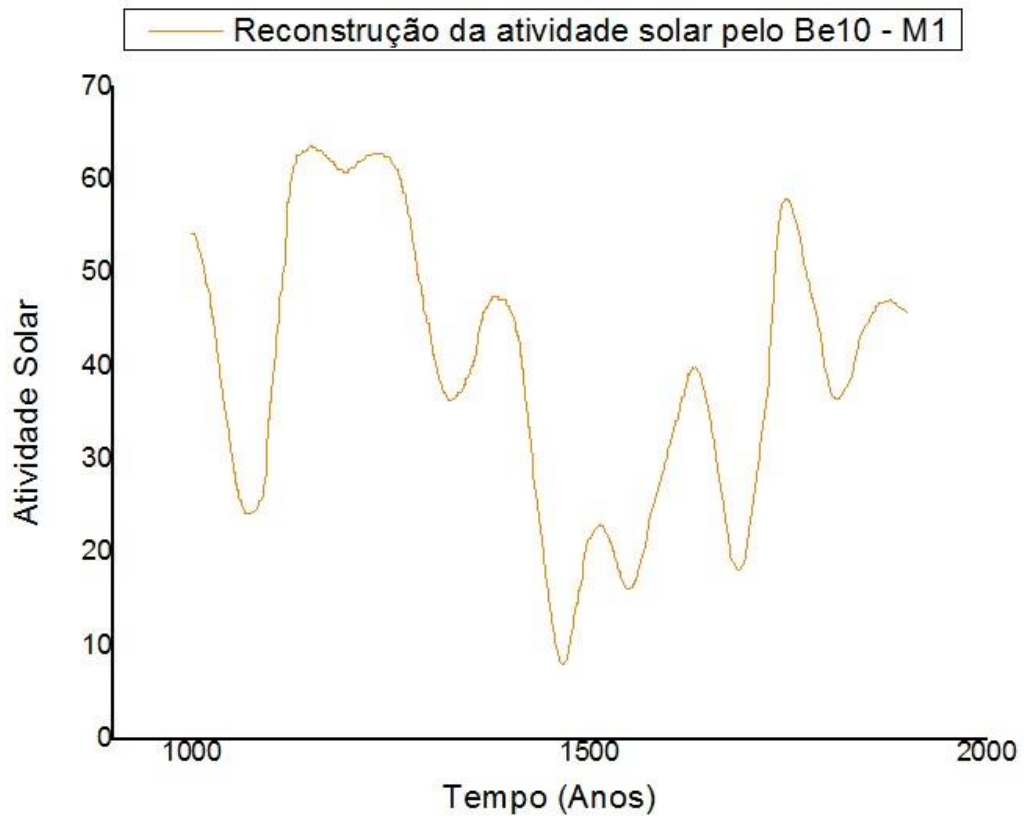


Figura 5-6: Reconstrução da média corrida de 22 anos das manchas solares entre 1000-1900 pelo Be10 - M1.

5.2 – Segundo Método (M2)

O método M2 utiliza a análise espectral para fazer a reconstrução da atividade solar. Primeiramente, é utilizado o programa ARIST citado por Rigozo (1994) nas séries temporais. É necessário fornecer ao programa a série temporal como arquivo de entrada, e ele gera como arquivo de saída o gráfico dos valores de entrada, o gráfico da análise espectral e uma tabela contendo os valores encontrados para o período, amplitude, frequência, fase e seus respectivos desvios. As figuras 5-7, 5-8 e 5-9 e as Tabelas 1, 2 e 3 mostram os arquivos gerados pelo programa na análise das séries temporais do ^{14}C , ^{10}Be e da média corrida de 22 anos das manchas solares.

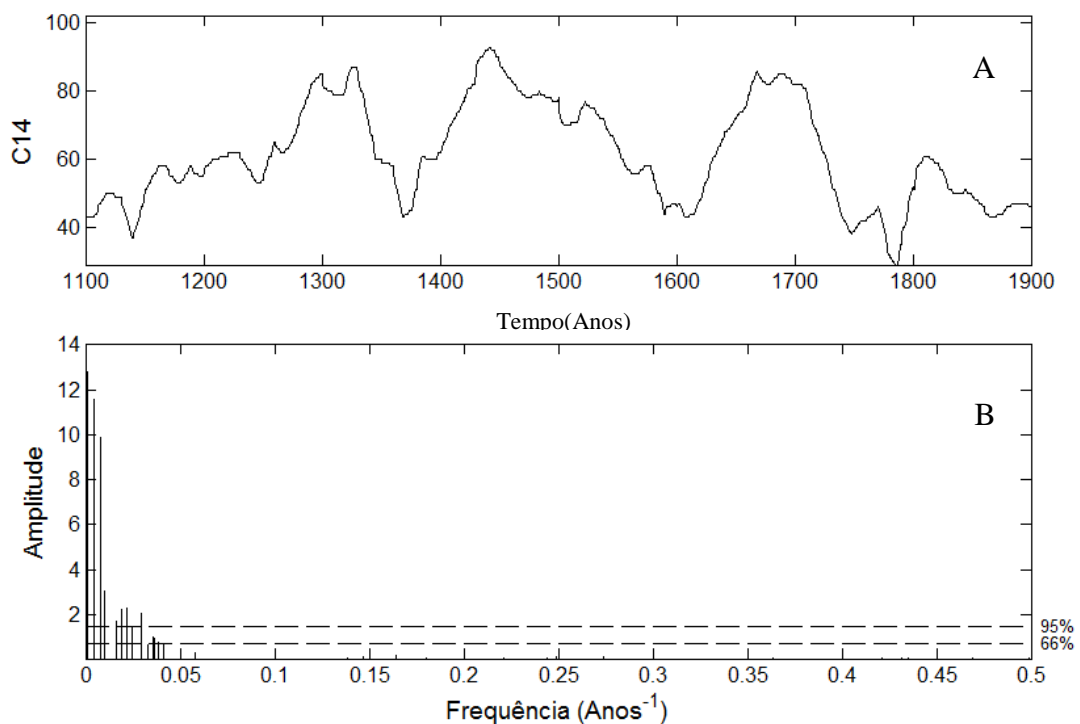


Figura 5-7: Resultados gerados pelo ARIST para o C14 - M2. A) representa o gráfico da concentração de C14 em função do tempo. B) mostra a análise espectral da série temporal de C14.

Tabela 1: Tabela de dados gerada pelo ARIST para o C14 -M2.

Período	Desvio	Amplitude	Desvio	Frequência	Desvio	Fase	Desvio	N. Iter.	66	95
847.495	24.114	12.776	0.628	0.001	0.000	5.214	0.088	21	0.733	1.466
217.235	1.706	11.575	0.624	0.005	0.000	3.162	0.107	21	0.733	1.466
125.255	0.726	9.909	0.647	0.008	0.000	3.499	0.134	15	0.733	1.466
102.497	1.751	3.052	0.731	0.010	0.000	1.189	0.487	81	0.733	1.466
60.110	1.065	1.704	0.742	0.017	0.000	1.740	0.861	16	0.733	1.466
53.191	0.642	2.230	0.738	0.019	0.000	5.464	0.656	42	0.733	1.466
46.066	0.468	2.282	0.739	0.022	0.000	5.058	0.642	39	0.733	1.466

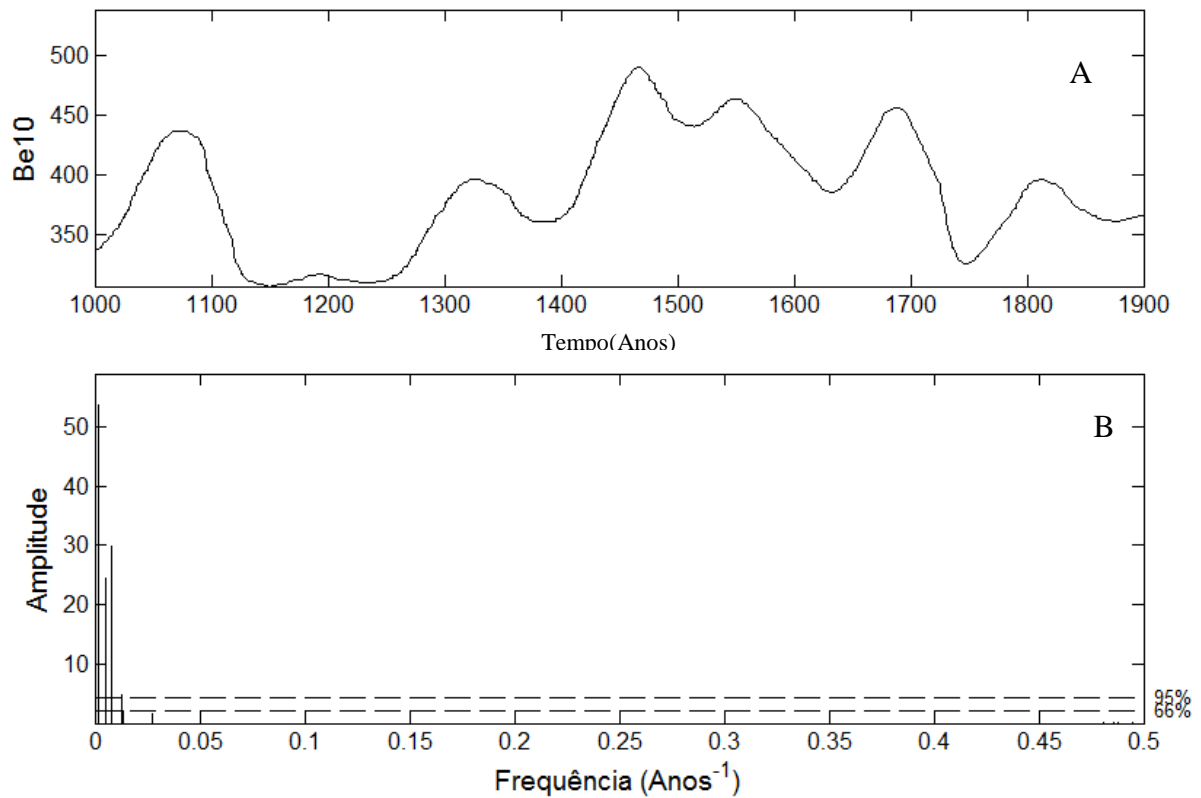


Figura 5-8: Resultados gerados pelo ARIST para o Be - M2. A) representa o gráfico da concentração de Be10 em função do tempo. B) mostra a análise espectral da série temporal de Be10.

Tabela 2: Tabela de dados gerada pelo ARIST para o Be10 -M2.

Periodo	Desvio	Amplitude	Desvio	Frequencia	Desvio	Fase	Desvio	N. Iter.	66	95
701.981	8.378	53.514	1.606	0.001	0.000	2.864	0.055	28	2.250	4.500
203.054	2.234	24.587	2.212	0.005	0.000	5.286	0.174	53	2.250	4.500
123.228	0.675	29.971	2.099	0.008	0.000	3.916	0.145	18	2.250	4.500
79.489	1.800	4.981	2.347	0.013	0.000	2.568	0.929	32	2.250	4.500
72.001	3.424	2.174	2.344	0.014	0.000	3.980	2.180	42	2.250	4.500
36.757	1.118	1.733	2.346	0.027	0.000	3.258	2.713	144	2.250	4.500

Tabela 3: Tabela de dados gerada pelo ARIST para a média corrida das Manchas Solares -M2.

Periodo	Desvio	Amplitude	Desvio	Frequencia	Desvio	Fase	Desvio	N. Iter.	66	95
96.587	1.835	1.001	0.070	0.010	0.000	3.732	0.150	12	0.095	0.189
58.357	1.041	0.753	0.086	0.017	0.000	4.629	0.227	34	0.095	0.189
16.336	0.533	0.136	0.100	0.061	0.000	2.644	1.457	108	0.095	0.189
14.773	0.582	0.103	0.100	0.068	0.000	3.296	1.965	134	0.095	0.189
10.186	0.151	0.186	0.100	0.098	0.001	2.597	1.066	56	0.095	0.189
9.280	0.372	0.064	0.100	0.108	0.002	3.089	3.172	56	0.095	0.189
8.814	0.284	0.074	0.100	0.113	0.002	1.894	2.680	61	0.095	0.189
8.201	0.250	0.074	0.100	0.122	0.002	3.028	2.726	71	0.095	0.189

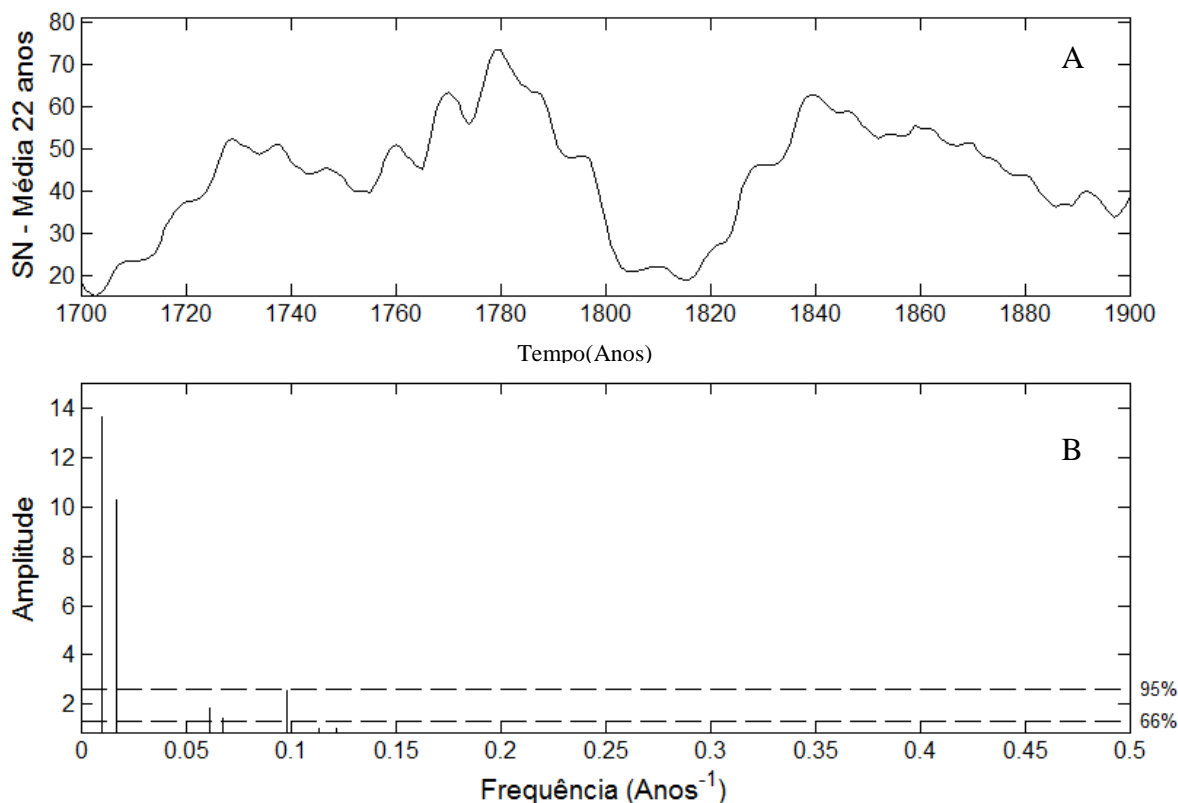


Figura 5-9: Resultados gerados pelo ARIST para a média corrida de 22 anos das manchas - M2. A) representa o gráfico média corrida de 22 anos das manchas solares em função do tempo. B) mostra a análise espectral da série temporal da série temporal da série corrida de 22 anos das manchas solares.

Como o programa gerou resultados numéricos, mostrados pelas Tabelas 1, 2 e 3, podemos utilizar os valores gerados para reconstruir as séries temporais, assim como está descrito na seção 3.9.1. A parte senoidal da equação 4.4 possui três parâmetros, a_0 , a_1 e a_2 , que são, respectivamente, os valores de amplitude, frequência e fase gerados pelo programa. Dessa forma, é preciso decidir quais dos períodos de dados serão utilizados na reconstrução do sinal. A escolha dos valores é feita analisando a amplitude do período. Caso o valor da amplitude seja duas vezes maior do que o seu desvio temos um período com 95% de confiabilidade. Além dessa condição, precisamos que os períodos utilizados para os isótopos sejam períodos próximos aos da média corrida de 22 anos das manchas solares, pois a etapa seguinte será a correlação entre as novas séries de isótopos e a nova série das manchas.

Os períodos selecionados para o carbono foram 102 e 60 anos, os períodos selecionados para a atividade solar foram 96 e 58 anos, porém não foram selecionados períodos para o berílio, pois este não possuía períodos semelhantes aos das manchas solares. Utilizando os dados dos períodos selecionados e substituindo-os na equação 4.4 obtivemos uma nova série temporal. A série temporal da média corrida de 22 anos das manchas solares reconstruída pelos valores obtidos pela análise espectral é mostradas na Figura 5-10.

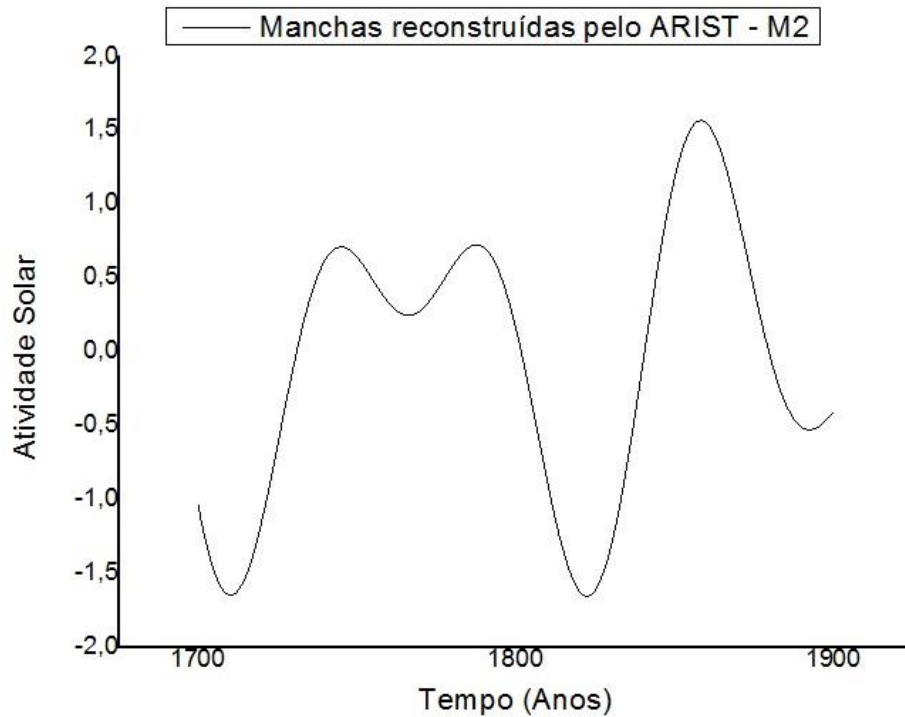


Figura 5-10: Série de Manchas Solares reconstruídas pela análise espectral - M2.

A partir desse momento, o método M2 lidarará apenas com duas séries temporais, que são as séries das manchas solares reconstruídas em M2 e a série de carbono 14 reconstruído em M2. A sequência do método será igual ao método M1, ou seja, é utilizado um intervalo de tempo de referência (1700-1900) para as séries. Em seguida é feita a correlação entre as séries nesse intervalo de referência, o valor obtido pela correlação é de $r = -0,88$. A reta de correlação é mostrada na Figura 5-11.

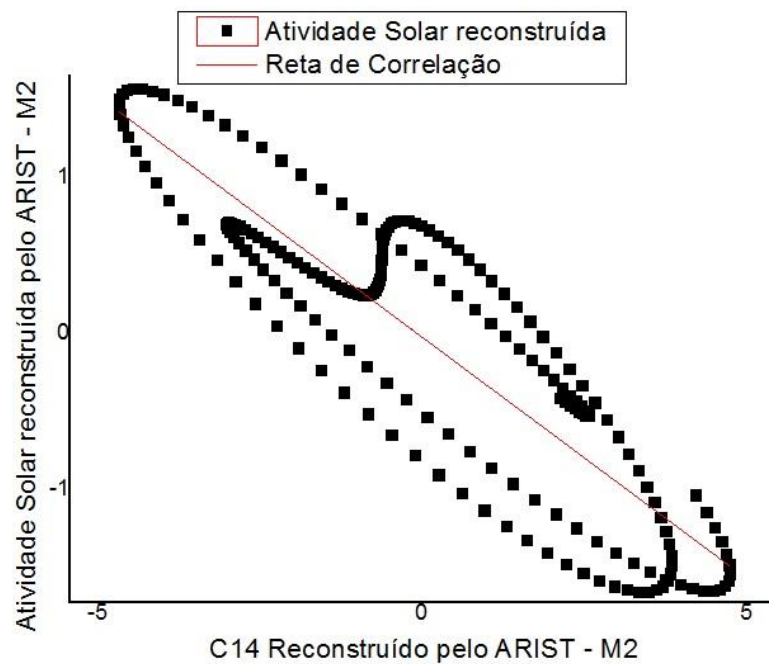


Figura 5-11: Reta de Correlação C14 reconstruído - M2.

Assim como em M1, utilizamos o resultado da reta de correlação para encontrar a equação da reta, que neste caso é dada pela Equação 5.3.

$$y = -0,02335 - 0,3086x \quad (5.3)$$

Na Equação 5.3 consideramos y como sendo o número de manchas solares e x com sendo os valores do ^{14}C reconstruído pela análise espectral. Portanto, substituindo os valores da série temporal gerada pelo carbono na equação 5.3, é obtida uma nova reconstrução da atividade solar no passado a partir de dados de ^{14}C . Esta reconstrução é mostrada na Figura 5-12.

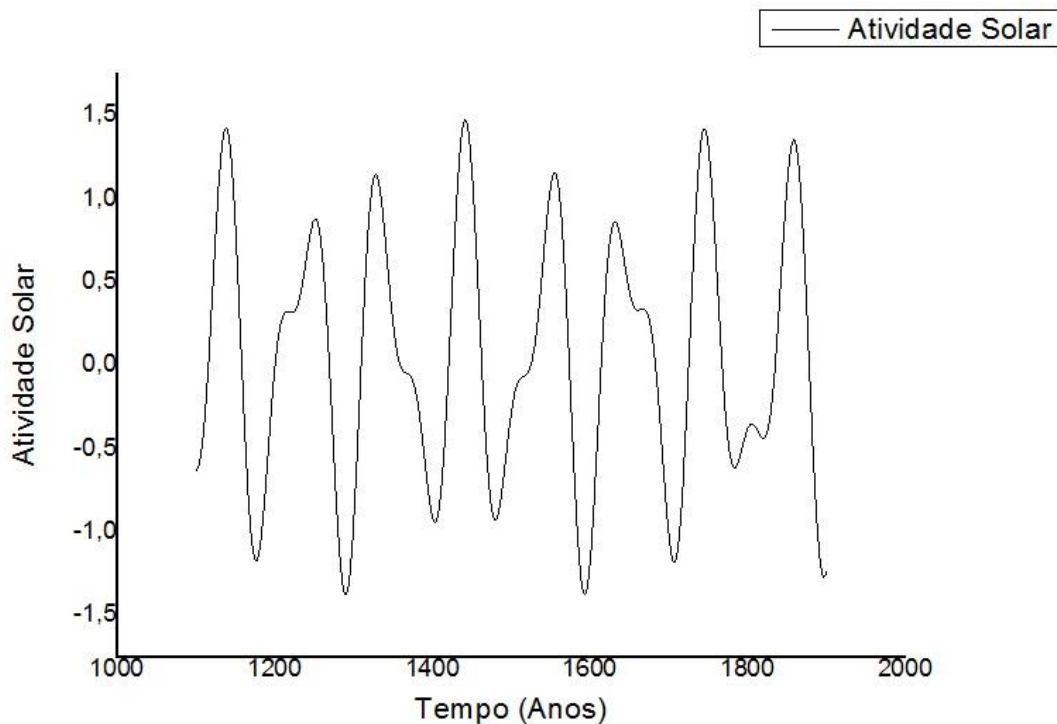


Figura 5-12: Reconstrução da Atividade Solar pelo C14 de 1100-1900 por M2.

5.3 – Terceiro Método (M3)

Assim como em M3, o terceiro método consiste no uso da análise espectral. A diferença entre M2 e M3 está nos dados que serão utilizados. Para M3, será utilizada a análise espectral nas reconstruções obtidas pelo método M1, ou seja, as séries temporais das Figuras 5-5 e 5-6 serão os dados de entrada do programa ARIST. As Figuras 5-13 e 5-14 e as Tabelas 4 e 5 mostram os arquivos gerados.

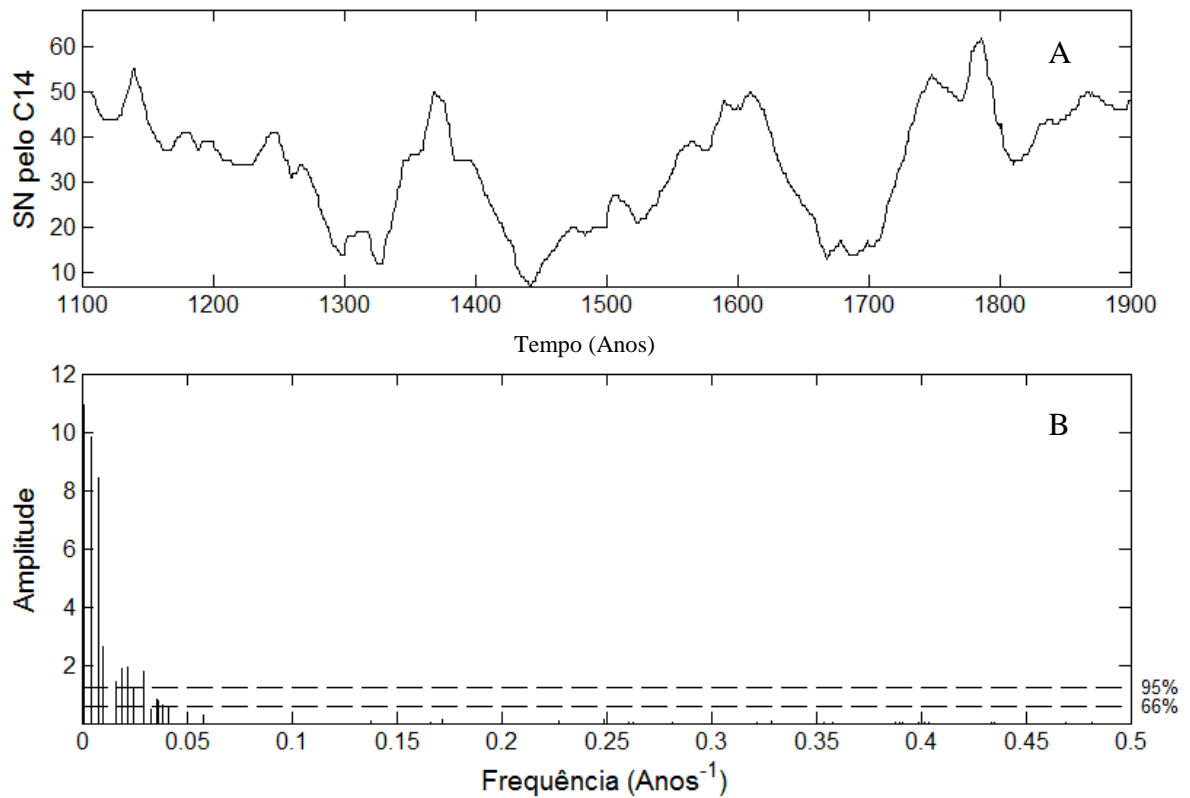


Figura 5-13: Resultados gerados pelo ARIST para a Reconstrução da Atividade Solar pelo C14 em M1. A) representa o gráfico da Reconstrução da Atividade Solar pelo C14 em M1. B) mostra a análise espectral da reconstrução.

Tabela 4: Resultados obtidos pelo ARIST para a reconstrução da atividade solar pelo C14 em M1.

Periodo	Desvio	Amplitude	Desvio	Frequencia	Desvio	Fase	Desvio	N. Iter.	66	95
847.106	24.019	10.934	0.536	0.001	0.000	2.070	0.088	19	0.625	1.250
217.126	1.710	9.858	0.533	0.005	0.000	0.014	0.107	26	0.625	1.250
125.283	0.727	8.458	0.553	0.008	0.000	0.356	0.134	16	0.625	1.250
102.449	1.727	2.640	0.624	0.010	0.000	4.319	0.481	109	0.625	1.250
60.181	1.066	1.457	0.634	0.017	0.000	4.918	0.860	17	0.625	1.250
53.184	0.642	1.903	0.630	0.019	0.000	2.323	0.656	34	0.625	1.250
46.065	0.464	1.963	0.631	0.022	0.000	1.917	0.637	35	0.625	1.250

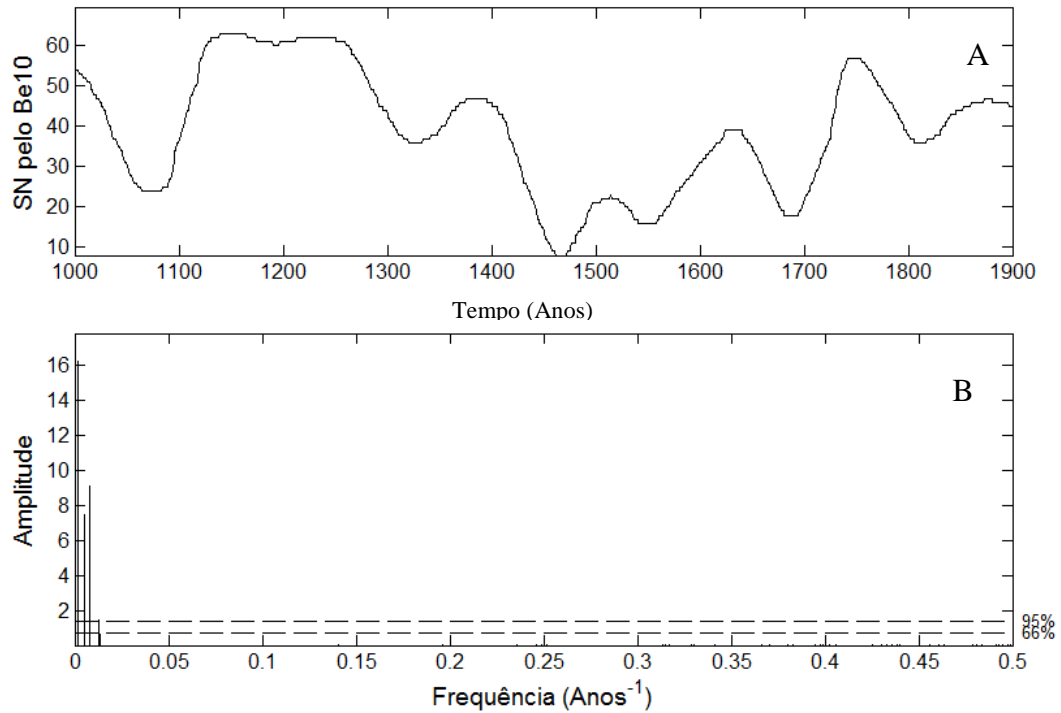


Figura 5-14: Resultados gerados pelo ARIST para a Reconstrução da Atividade Solar pelo Be10 em M1. A) representa o gráfico da Reconstrução da Atividade Solar pelo Be10 em M1. B) mostra a análise espectral da reconstrução.

Tabela 5: Resultados obtidos pelo ARIST para a reconstrução da atividade solar pelo Be10 em M1.

Período	Desvio	Amplitude	Desvio	Frequência	Desvio	Fase	Desvio	N. Iter.	66%	95%
702.617	8.386	16.224	0.487	0.001	0.000	6.009	0.055	26	0.704	1.409
203.037	2.228	7.470	0.670	0.005	0.000	2.147	0.174	37	0.704	1.409
123.217	0.675	9.081	0.636	0.008	0.000	0.770	0.145	17	0.704	1.409

Para escolher os períodos a serem utilizados na reconstrução, assim como em M2, foram selecionados aqueles cujas amplitudes fossem duas vezes maiores do que seus respectivos desvios, o que nos concede 95% de precisão. Diferentemente de M2, foram reconstruídas as séries de M3 para todos os períodos de precisão 95%.

O resultado final do processo são duas reconstruções da atividade solar, uma a partir da reconstrução de M1 do Carbono, com intervalo de tempo de 1100-1900, e outra a partir da reconstrução de M1 do Berílio, com intervalo temporal de 1000-1900. As Figuras 5-15 e 5-16 mostram as séries temporais de reconstrução da atividade solar obtidas por M3.

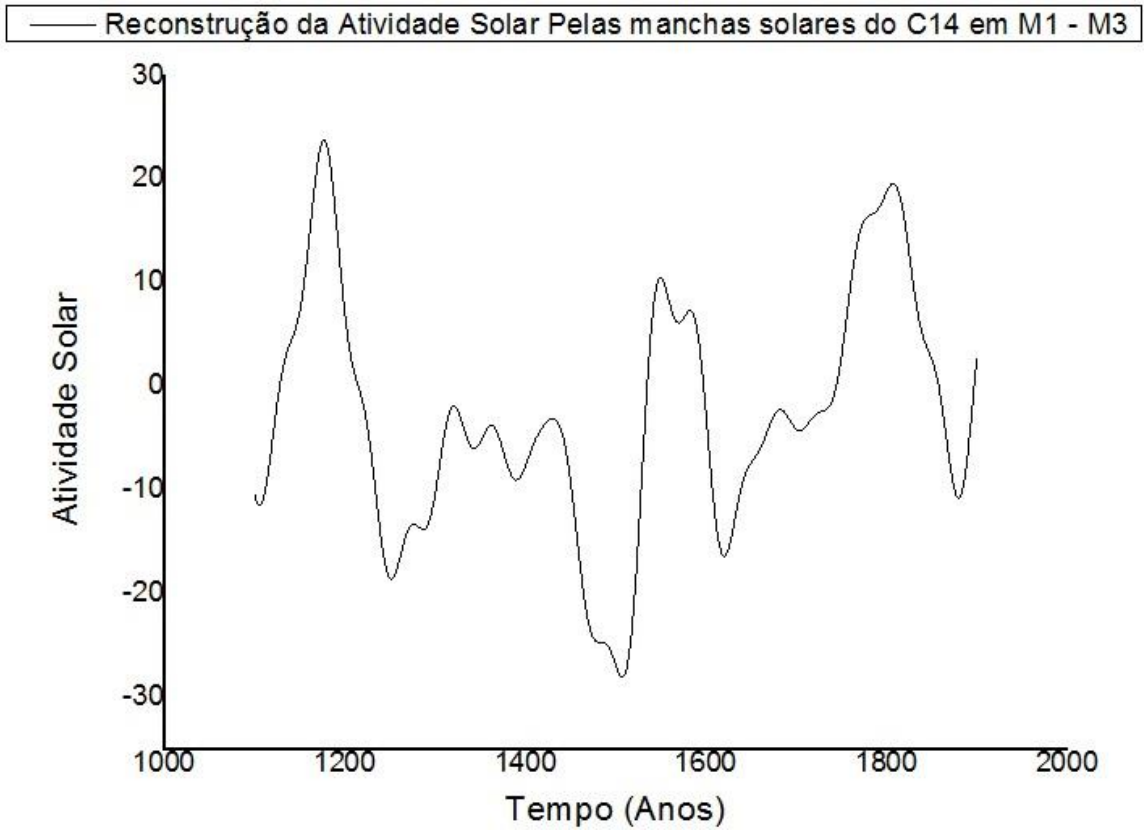


Figura 5-15: Reconstrução da Atividade Solar a partir dos resultados do C14 em M1 - M3.

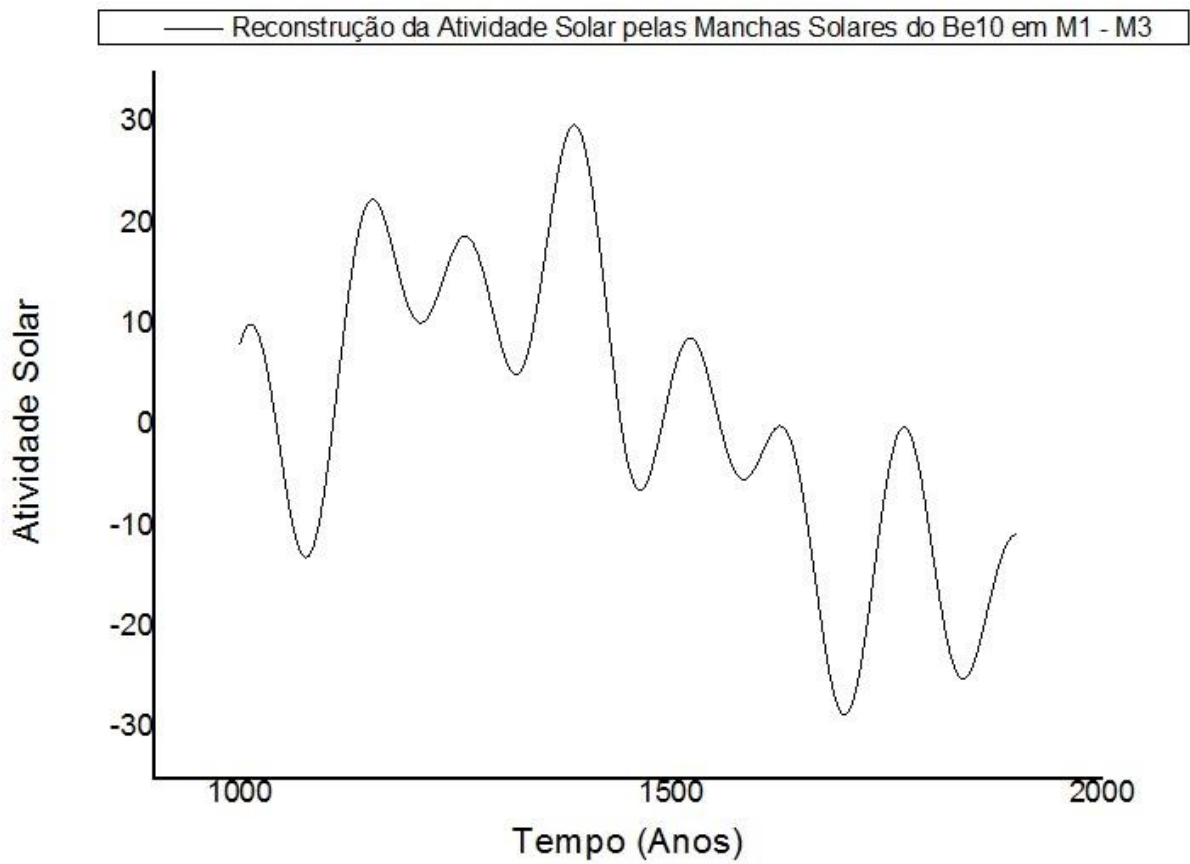


Figura 5-16: Reconstrução da Atividade Solar a partir dos resultados do Be10 em M1 - M3.

5.4 – Comparação de Resultados

Para comparação dos resultados obtidos pelos métodos M1, M2 e M3 com a série temporal da média corrida de 22 anos das manchas solares. Para isso, é necessário que sejam considerados os resultados apenas no intervalo de tempo de referência (1700-1900 A.D.). As Figuras 5-17, 5-18, 5-19, 5-20 e 5-21 mostram as séries temporais obtidas no intervalo de referência.

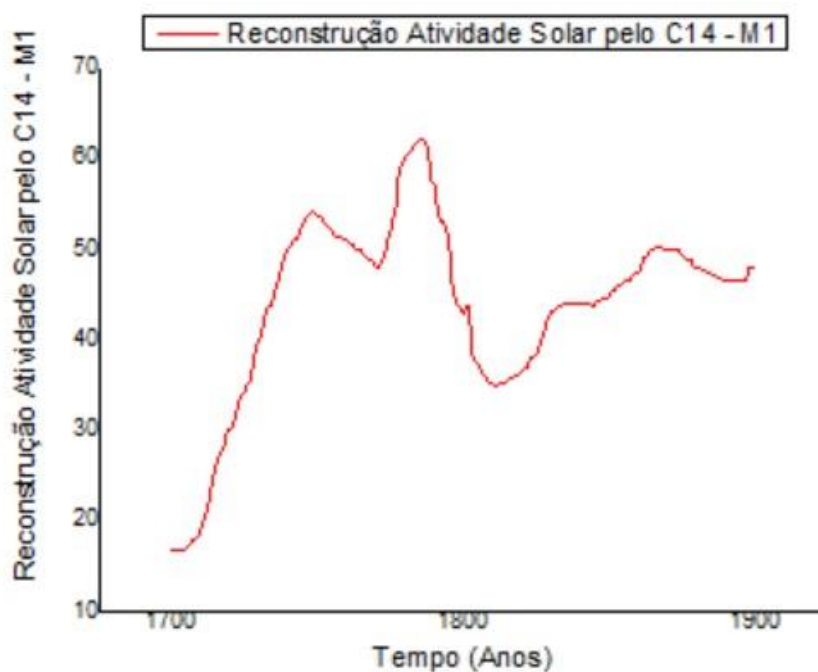


Figura 5-17: Reconstrução pelo C14 - M1 entre 1700 - 1900.

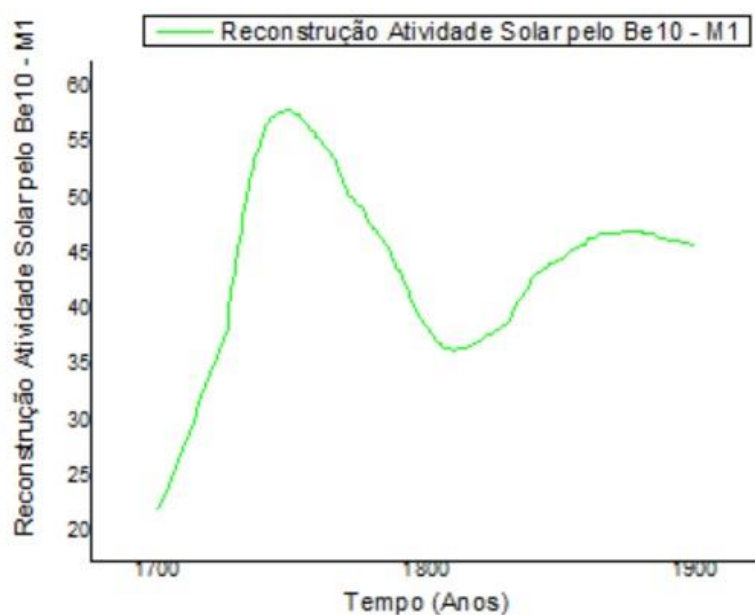


Figura 5-18: Reconstrução pelo Be10 - M1 entre 1700 - 1900.

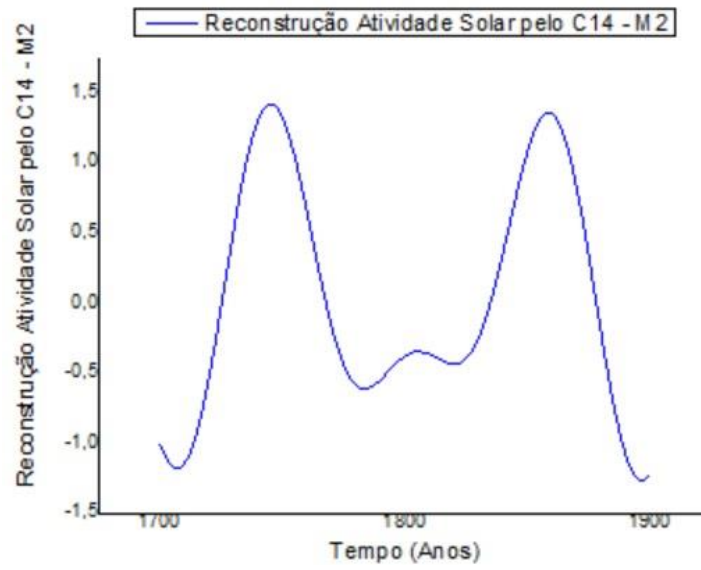


Figura 5-19: Reconstrução pelo C14 – M2 entre 1700 – 1900.

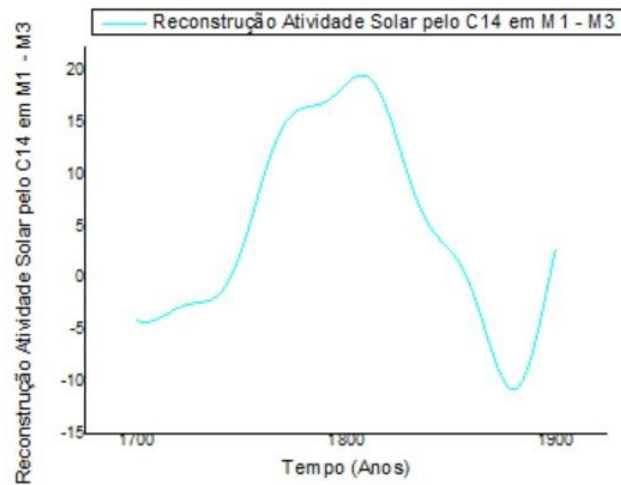


Figura 5-20: Reconstrução pelo C14 de M1 - M3 entre 1700 - 1900.

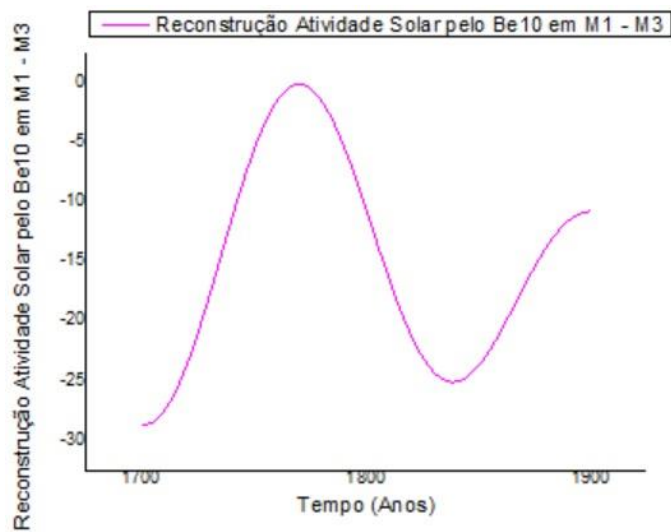


Figura 5-21: Reconstrução pelo Be10 de M1 - M3 entre 1700 - 1900.

5.4.1 – Interpretação dos Resultados

A comparação feita pela correlação das séries apresentadas pelas Figuras de 34 até 38 com a série da média corrida de 22 anos das manchas solares mostrada pela Figura 16 gerou as correlações representadas pela Tabela 6.

Tabela 6: Resultados de correlação entre resultados obtidos e série da média corrida de 22 anos das manchas solares.

Série comparada com a média corrida de 22 anos	r=
C14 por M1	0,74
Be10 por M1	0,6
C14 por M2	0,44
C14 de M1 por M3	0,06
Be10 de M1 por M3	0,4

Considerando os resultados mostrados na Tabela 6, é possível verificar que todos os resultados obtidos estão em correlação com a série das manchas solares desviadas em 22 anos. Isso ocorre pois estamos lidando com séries que representam a atividade solar e podemos comprovar isso matematicamente pelo valor das correlações, onde todos os resultados são maiores do que zero.

Entretanto, nem todos os resultados são satisfatórios em magnitude. Podem ser considerados, estatisticamente, como bons resultados os gerados pelo primeiro método, pois estes tem magnitude cujo módulo é maior ou igual à 0,6. Os resultados de M2 e de M3 para o berílio possuem valores próximos à 0,5, sendo resultados pouco satisfatórios. Já o resultado de M3 para o carbono é considerado insatisfatório pois o módulo de sua correlação é menor do que 0,1.

Rigozo et al. (2001) fornece o valor da correlação entre sua série reconstruída e sua série original, no intervalo de tempo entre 1700-2000 A.D., como havia sido mostrado da Figura 9. A correlação obtida por Rigozo et al. (2001) foi de $r = 0,81$, uma correlação que é considerada boa, assim como as duas correlações obtidas pelo método M1.

Outra forma de caracterizar os resultados obtidos é encontrar nas séries reconstruídas os períodos de atividade solar que foram descritos na seção 3.9. Considerando os períodos de atividade solar descritos por Rigozo et al. (2001), Bard et al. (1997) e Stuvier e Quay (1980), podemos descrever os períodos encontrados para cada reconstrução da atividade solar no passado.

Na reconstrução por M1 através do carbono é possível encontrar períodos que caracterizam os mínimos de Maunder, Spörer e Wolf, além de haver indícios de um possível período de

máximo Moderno. A reconstrução através do berílio pelo método M1, fornece indícios de períodos como os mínimos de Dalton e Spörer, assim como o período de máximo Medieval.

Como não foram obtidos períodos semelhantes entre a média corrida de 22 anos das manchas solares e o berílio, o método M2 gerou resultados apenas para a série de carbono. Nessa reconstrução por carbono a partir do método M2 foi possível encontrar períodos de atividade solar tais quais os mínimos de Dalton, Maunder, Spörer e Wolf, além do máximo Medieval. Como o resultado da correlação entre a série de carbono por M2 e a série da média corrida de 22 anos das manchas solares foi baixa, o gráfico tem seus períodos difíceis de serem interpretados, o que pode atrapalhar na identificação exata dos períodos.

Nas séries geradas pelo método M3, assim como na série gerada por M2, temos baixa correlação entre a série utilizada como base e o resultado obtido. Portanto, a identificação dos períodos fica comprometida. Na série gerada a partir do carbono em M3, que é a série de menor valor de correlação, muitos dos períodos se confundem, gerando dificuldade em sua identificação. Porém, parecem existir períodos semelhantes ao máximo Medieval e ao mínimo de Spörer. A reconstrução pelo berílio através do método M3 possui um gráfico, assim como a série de M2, difícil de ser analisada. Ainda assim, parece existir um período de mínimo em um intervalo de tempo semelhante ao mínimo de Maunder, embora seja difícil analisá-lo com precisão.

6 – CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho é estudar a atividade solar no passado, utilizando a radiação cósmica como parâmetro. Dessa forma, foram utilizados os métodos de correlação e regressão linear, além do método de análise por regressão iterativa, para gerar a reconstrução da atividade solar no passado. As reconstruções foram feitas a partir de três métodos diferentes, denominados M1, M2 e M3. M1 fez uso dos métodos de correlação e regressão linear, e gerou a reconstrução da atividade solar no passado a partir dos dados de concentração de carbono e berílio. M2 fez uso do método de análise por regressão iterativa, mas, devido aos resultados obtidos, só foi possível reconstruir a atividade solar no passado para os dados de carbono. M3 também fez uso do método de análise por regressão iterativa, mas, diferentemente de M2, a regressão iterativa foi aplicada aos resultados obtidos em M1, pois isso deveria fornecer uma análise mais correta dos resultados.

O trabalho cumpriu com o objetivo do estudo da atividade solar no passado, pois foi possível encontrar correlações satisfatórias (pelo método M1) entre a série de manchas solares reconstruídas e da média corrida de 22 anos das manchas solares, que foi o parâmetro da variabilidade solar utilizado. Além disso foi possível encontrar picos e vales nos gráficos das reconstruções semelhantes a períodos importantes da atividade solar, períodos estes descritos em trabalhos como Rigozo et al. (2001), Bard et al. (1997) e Stuvier e Quay (1980).

Porém, não foram todos os métodos que geraram resultados satisfatórios. Todavia, todos eles conseguiram cumprir com seu objetivo de estudo da atividade solar e geraram ao menos um resultado importante. A reconstrução obtida por M1 para o carbono obteve um grau de correlação de 0,74 em relação a série de manchas solares utilizada, que é considerado um bom resultado. A reconstrução pelo berílio no método M1 obteve correlação de 0,6 que também é considerado, estatisticamente, um bom resultado. A reconstrução pelo carbono em M2 e pelo berílio em M3 apresentaram correlações de, respectivamente, 0,44 e 0,4 que são resultados pouco satisfatórios. Ainda assim foi possível identificar períodos semelhantes aos mínimos de Maunder, Dalton, Spörer e Wolf, além do máximo Medieval, para a reconstrução do carbono em M2, e um período semelhante ao mínimo de Maunder para a reconstrução pelo berílio em M3. A reconstrução pelo carbono em M3 gerou a pior correlação de todas, com coeficiente de correlação de apenas 0,06. Apesar disso, este resultado apresentou um comportamento senoidal esperado para uma reconstrução da atividade solar, e parece haver indícios de períodos semelhantes ao máximo Medieval e ao mínimo de Spörer, embora esses resultados não sejam confiáveis por causa do baixo índice de correlação.

A pesquisa pode ter continuidade em projetos futuros, a fim de estudar e aperfeiçoar estes métodos para que se obtenham resultados melhores. Ou ainda, que se criem novos métodos capazes de gerar maior precisão nos resultados.

REFERÊNCIAS

BARD, E.; RAISBACK, G. M.; YIOU, F.; JOUZEL, J. Solar modulation of cosmogenic nuclide production over the last millenium: comparison between ^{14}C and ^{10}Be records. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 150, 1997, p.453-462.

BEER, J.; ANDRE, M.; SIEGENTHALER, U.; BONANI, G.; FINKEL, R.C.; OESCHGER, H.; SUTER, M.; LANGWAY, C. JR. The camp Century ^{10}Be record: implications for long-term variations of the geomagnetic dipole moment. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, B5(2) : 380-384, 1984.

BEVINGTON, P. R. **Data reduction and error analysis for the physical sciences**. New York: McGraw-Hill, 1969. 335p.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

EDDY, J.A. The Maunder Mimimum. **Science**, v.192, 1976.

ECHER, E.; RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R.; VIEIRA, L. E. A.; PRESTES, A. P.; FARIA, H. H. O número de manchas solares, índice da atividade do Sol/Sunspot NUMBER, Solar Activity Index. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 2, n. 157, (p.157-163_) jun. 2003. (INPE-10244-PRE/5759).

FARLOW, S.J. (ed.), 1984, Self-Organizing Method in Modeling: GMDH Type Algorithms. Statistics: Textbooks and Monographs, **54**.

HARDIN, J.C. Introduction to time series analyses. **NASA reference Publication**, v.1145, p.119-129, 1986.

HATHAWAY, D. H. The Solar Dynamo. In: SUESS, S.T.;TSURUTANI, B.T. **From the Sun**. Washington, 1998. p.113-122.

HAYMES, R. C. **Introduction to space Science**. New York, John Wiley, 1971.

HOYT, D.V.; SCHATTEN, K.H. *The role of the Sun in Climate Change*, Oxford University Press, New York (1997).

INCEOGLU, F.; KNUDSEN, M. F.; KAROFF, C.; OLSEN, J. Modeling the Relationship Between Neutro Counting Rates and Sunspot Number Using the Hysteresis Effect, **Solar Phys** (2014) 289:1387-1402.

JENKINS, G.M.; WATTS, D.G. **Spectral analysis and its applications**. San Francisco: Holden Day, 1968. 524 p.

JOKIPII, J.R. Cosmic Rays. In: SUESS, S.T.;TSURUTANI, B.T. **From the Sun**. Washington, 1998. p.123-131.

KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T. Introduction to Space Physics. LosAngeles: Cambridge University Press, 1995. 568p.

MADALA, H.R.; IVAKHNENKO, A. G.: 1994, Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling, CRC Press, Boca Raton.

McHARGUE, L. R.; DAMON, P. E. The global beryllium 10 cycle. **Reviews of Geophysics**, 29(2): 141-158, 1991.

MILETSKY, E. V.; IVANOV, V.G.; NAGOVITSYN, Y. A.; JUNGNER, H. Solar activity in the past: from different proxies to combined reconstruction. **Solar Physics**, v. 224, p. 77-84, 2004.

MORRIS, J.D. Applications of cosmogenic ^{10}Be to problems in earth sciences. **Annual Review of Earth Planetary Science**, 19:313-350, 1991.

NORDEMAN, D. J. R. -1992- Search for periodicities in geophysical time series by iterative regression analysis in C. São José dos Campos, INPE, 1992. 20p. (INPE-5420-PRE/1762).

O'BRIEN, K. Secular variations in the production of cosmogenic isotops in the Earth's atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, 84(A2) : 423-431, 1979.

PRESTES, A. **Estudo estatístico da variabilidade dos índices geomagnéticos e sua relação com o ciclo solar**. 2009. 112 p. (INPE-15716-tdi/1473). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGPAW/Q2CTAH>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

PRIEST, E.R. **Solar magneto-hydrodynamics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1987. 369p. Geophysics and Astrophysics Monographs.

RAIBECK, G.M.; YIOU, F. Production of long-lived cosmogenic nuclei and their applications. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, B5 (2): 91-99, 1984.

RIGOZO, N.R. **Análise por regressão iterativa de periodicidades nas variações dos cosmonuclídeos atmosféricos Be-10 e C-14**. 1994. 79 p. (INPE-5547-TDI/533). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

RIGOZO, N. R. Detecção de CME e determinação de suas características dinâmicas por imagens digitais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – 2010(Submetido)

RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D. J. R.. Análise por regressão iterativa de periodicidades em séries temporais de registros geofísicos. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 16, n. 2-3, July 1998.

RIGOZO, N. R.; ECHER, E.; VIEIRA, L. E. A.; NORDEMANN, D. J. R. Reconstruction of Wolf sunspot numbers on the basis of spectral characteristics and estimates of associated radio flux and solar Wind parameters for the last millennium. **Solar Physics**, v. 203, n.1, p. 179-191, 2001. (INPE-8888-PRE/4597).

SCHOVE, D.J., *Sunspot Cycles*, Hutchinson Ross Publishing Company, Strousburg, Pennsylvania (1983).

SILVA, M. R. **Variação da intensidade dos raios cósmicos em resposta a diferentes estruturas magnéticas do meio interplanetário**. 2005. 149 p. (INPE-15242-TDI/1329). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MCT-m13@80/2005/10.25.19.23>>. Acesso em: 08 mar. 2014.

SILVA, M. R. **Detecção de distúrbios solar-interplanetários combinando observações de satélite e de raios cósmicos de superfície para aplicação em clima espacial**. 2010. 140 p. (sid.inpe.br/mct-m12@80/2009/11.30.12.58-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/36G6PES>>. Acesso em: 08 mar. 2014.

SOLANKI, S. K.; USOSKIN, I. G.; KROMER, B.; SCHÜSSLER, M.; BEER, J. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years, **Nature**, 431, 1084-1087, 2004.

STUVIER, M.; BRAZIUNAS, T.F. Atmospheric ^{14}C and century-scale solar oscillations, **Nature**, 338(6214) : 405-407, 1989.

STUVIER, M.; QUAY, P. D. Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. **Science**, 207 (4426) : 11-19, 1980.

TSURUTANI, B.T.; GONZALEZ, W.D. Magnetic Storms. In: SUESS, S.T.;TSURUTANI, B.T. **From the Sun**. Washington, 1998. p.57-66.

USOSKIN, I. G.; KROMER, B. Reconstruction of the ^{14}C production rate from measured relative abundance. **Radiocarbon**, v. 47, Nr 1, 2005, p. 31-37.

WOLBERG, J. R. -1967- Prediction analysis. Northland D. Van Nostrand.