Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Escola de Ciência e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial

Estudo sobre a influência dos ciclos solares nas condições atmosféricas na região de jurisdição da FIR Curitiba (FIR - SBCW)

Arthur Bandeira Luz de Lima

Natal - RN, 2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Escola de Ciência e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial

Estudo sobre a influência dos ciclos solares nas condições atmosféricas na região de jurisdição da FIR Curitiba (FIR - SBCW)

Arthur Bandeira Luz de Lima

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Aeroespacial**, orientado pelo Dsc. José Henrique Fernandez.

Natal - RN

2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Lima, Arthur Bandeira Luz de.
Estudo sobre a influência dos ciclos solares nas condições atmosféricas na região de jurisdição da FIR Curitiba (FIR - SBCW) / Arthur Bandeira Luz de Lima. - 2022.
180 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Escola de Ciência e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial. Natal, RN, 2022.
Orientador: Prof. Dr. José Henrique Fernandez.

1. Ciclo solar - Dissertação. 2. Manchas solares - Dissertação. 3. Atmosfera solar - Dissertação. 4. Raios cósmicos galácticos - Dissertação. I. Fernandez, José Henrique. II. Título.

RN/UF/BCZM CDU 523.982

Elaborado por Kalline Bezerra da Silva - CRB-15/327

Estudo sobre a influência dos ciclos solares nas condições atmosféricas na região de jurisdição da FIR Curitiba (FIR - SBCW)

Arthur Bandeira Luz de Lima

Dissertação APROVADA pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

---

Prof. Dr. José Henrique Fernandez (Orientador) ..... ECT/UFRN

Prof. Dr. Dino Lincoln Figueiroa Santos (Membro Interno) .... DDGN/UFRN

Prof. Dr. Filipe Emanuel Vieira Taveiros (Membro Externo) ..... CLBI

Natal - RN, 21 de Fevereiro de 2022

Ao meu pai que se foi tão cedo, dedico este trabalho.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe e esposa por todo apoio e suporte dados a mim durante a realização dessa pesquisa.

No princípio criou Deus os Céus e a Terra.

Livro de Gênesis

LIMA, Arthur Bandeira Luz de. **Estudo sobre a influência dos ciclos solares nas condições atmosféricas na região de jurisdição da FIR Curitiba (FIR-SBCW)**. 2021. 190 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

Resumo

Embora existam registros de observações de Manchas Solares que datam para anos antes de Cristo, a contagem sistemática do Número de Manchas Solares passou a ser registrada somente após o século XVII. Não há dúvidas que a natureza do ciclo solar deve-se à variações morfológicas na estrutura de campo magnético do Sol. Um conjunto de processos físicos no interior da estrela faz com que as linhas de campo magnético solar sofram variações sistemáticas ao longo de um período de 11 anos. O ciclo de atividade solar interfere, em diversos aspectos, na vida moderna. O aumento na quantidade de Erupções Solares e Ejeções de Massa Coronal podem comprometer tanto a vida útil de satélites e sondas espaciais quanto a saúde de astronautas e tripulantes a bordo de aeronaves que cruzam os polos em grandes altitudes. O aumento gerado na emissão solar em Ultravioleta Extremo e Raio-X provocam variações termodinâmicas na alta atmosfera, que, por sua vez, podem diminuir o tempo de vida orbital dos satélites de baixa órbita. Trabalhos como Svensmark e Friis-Christensen (1997) comprovaram que tais variações no campo magnético solar também influenciam nas condições termodinâmicas da baixa atmosfera. Segundo esses autores, a maior penetração de Raios Cósmicos Galácticos (RCG) durante os mínimos solares provocam um aumento na síntese de aerossóis em suspensão na atmosfera, favorecendo assim um aumento na cobertura de nuvens. Além disso, trabalhos como o de Eddy (1976) mostraram que durante o período conhecido como **Mínimo de Maunder**, a Terra experimentou um resfriamento anômalo. Diante disso, esse trabalho teve como objetivo investigar a correlação entre as atividades solares e as condições atmosféricas observadas nas cidades de Campo Grande, Curitiba, Porto Alegre e Rio de Janeiro, durante os ciclos solares 19, 20, 21, 22 e 23 (i.e entre 1958 e 2008). Tais municípios encontram-se distribuídos dentro da área de jurisdição da Região de Informação de Voo de Curitiba (FIR-SBCW), onde uma grande quantidade de aeronaves a cruza diariamente e é constantemente afetada por condições atmosféricas adversas a segurança de voo, tais como nevoeiros, trovoadas e formação de gelo. Para cumprir esse objetivo, utilizou-se técnicas de Wavelet para avaliar, inicialmente, a influência dos ciclos solares na penetração de RCG observadas nas estações de Hermanus e Potchefstroom, situadas na África do Sul e, portanto, dentro da faixa latitudinal onde encontra-se a FIR-SBCW. Feito isso, também

utilizando técnicas de Wavelet, efetuou-se a reconstrução das séries temporais relativas ás condições climáticas observadas nas cidades citadas, para as escalas de períodos de 64, 128 e 256 meses. Por fim, avaliou-se o grau de coerência entre essas séries e os indicadores de atividade solar Número de Manchas e Emissão F10.7. Concordando com trabalhos anteriores, como Belov (2000), observou-se níveis de coerência próximos a 1 para a escala de período de 128 meses, entre a penetração de RCG dentro da faixa latitudinal citada, e os indicadores de atividade solar, além de uma diferença angular de fase próxima a 180º, indicando assim uma correlação negativa. Com exceção da série temporal relativa à temperatura superficial média em Porto Alegre, todas as séries relativas às condições climáticas apresentaram periodicidade de 64, 128 e 256 meses. Por fim, quanto a coerência entre essas séries climáticas e os indicadores de atividade solar, observou-se elevados graus de coerências para as sazonalidades de 64, 128, 256 e 512 meses, mostrando assim que existe uma influência entre os ciclos solares e as condições meteorológicas dessa região.

Palavras-chave: Ciclo Solar, Raios Cósmicos Galácticos, Atmosfera, Aviação.

LIMA, Arthur Bandeira Luz de. **A study about the influence of the solar cycles over the Curitiba Flight Information Region atmospheric conditions**. 2021. 190 p. Master's Dissertation in Aerospatial Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2021.

Abstract

Although there were SSN records dating to years before Christ, the systematic counting of SSN were recorded after the 17^{th} Century, only. There is no doubt that the solar cycle nature is due to morphological variation in the Sun Magnetic Field Structure. An ensemble of physics processes inside the Sun makes that magnetic field lines undergo though systematic variation along 11 years. This solar cycle interfere, in many ways, the modern life. The increase in the Solar Flares and Coronal Mass Ejection number may compromise both the satellite/spacecraft lifespan and astronauts in the space and flight crew who travel through the poles health. The increase generated in Solar emission in Extreme Ultraviolet (EUV) and X-Ray cause thermodynamic variation in the upper atmosphere, which, in their turn, might shorten the orbital lifetime of low orbit satellite. Works e.g Svensmark and Friis-Christensen (1997) proved that such solar variations also influence the thermodynamics lower atmosphere conditions. According to these authors, greater Galactic Cosmic Rays (CGR) penetration during solar minimums causes an increase in the aerosols synthesis, favoring an increase in the cloud cover. Beside that, works e.g Eddy (1976) showed that the period known **Maunder Minimum**, the Earth experienced an anomalous cooling. That said, this work aimed to investigate correlations between solar activities and atmospheric conditions observed at Campo Grande, Curitiba, Porto Alegre and Rio de Janeiro cities, during the solar cycles 19, 20, 21, 22 and 23. These cities are distributed inside the Flight Information Region Curitiba (SBCW-FIR), where a large amount of aircraft crosses every day. Beside that, this region is often affected by meteorological conditions that may interfere in the flight safety, such as icing, thunderstorms and fogs. In order to comply this objective, initially, Wavelet techniques were used to investigate the correlation between CGR flux observed at Hermanus and Potchefstroom stations and the solar activity indexes SSN and F10.7 Solar Emission. These stations are located in South Africa, and therefore, inside the latitudinal range where the SBCW-FIR is located in. In addition, meteorological data collected from those cited cities where reconstructed for the scales of 64, 128 and 256 months. Finally, the coherence level between these time series and SSN and F10.7 time series was evaluated. Agreeing with other work (e.g Belov (2000)), it was observed coherence level close to 1 between CGR and SSN/F10.7 time series, for

the periodicity close to 11 years, at a phase angle close to 180º. With the exception of 128 scale period for the mean surface temperature in Porto Alegre, all time series regarding to atmospheric conditions showed periodicity of 64, 128 and 256 months. Regarding to the coherence level, it was observed high levels for the seasonality close to 64, 128, 256 and 512 months. In other words, there are correlations between the solar cycles and the atmospheric conditions inside this region.

Keywords: Solar Cycle, Galactic Cosmic Rays, Atmosphere, Aviation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Regiões de Informações de Voo que compõe o espaço aéreo brasileiro. Imagem tirada do link: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Departamento_de_Controle_do_Espaço_Aereo> 38
Figura 2 – Distribuição das estações de monitoramento de nêutrons ao redor do mundo, com ênfase nas utilizadas para essa pesquisa. Imagem tirada do link: <http://www.wdcb.ru/stp/cosmic_rays/cosmic_rays.html> . 39
Figura 3 – Camadas internas do Sol(Fonte: Autor) 46
Figura 4 – Imagem da superfície do Sol tirada em 13 de Maio de 2005 pelo Telescópio Solar em La Palma (Adaptado de KARTUNNEN ET AL, 2017) 48
Figura 5 – Diagrama esquemático do Campo Magnético Solar durante o Mínimo Solar (PORTUGAL, 2018) 50
Figura 6 – Evolução do Campo Magnético Solar (KARTUNNEN ET AL, 2017) . 50
Figura 7 – Distribuição espaçotemporal das Manchas Solares sobre a superfície do Sol (HATHAWAY, 2015) 51
Figura 8 – Número suavizado de Manchas solares desde 1700 a 2000: Número Internacional de Manchas (linha contínua) e Número de Grupo de Manchas Solares (Linha tracejada)(Adaptado de HATHAWAY et al, 2002) 53
Figura 9 – Regra de Gnevyshev - Ohl. Os pontos pretos denotam a razão entre o Número de Manchas Solares entre os ciclos ímpares e pares. Os pontos brancos, a razão de amplitude entre os ciclos ímpares e pares 53
Figura 10 – Ejeção de Massa Coronal de grande magnitude observada pela sonda espacial SoHO em 5 de Agosto de 1999 (KARTTUNEN et al, 2017). . . 55
Figura 11 – Medições diárias da constante solar a partir de distintos instrumentos embarcados em satélites e sondas espaciais (HATHAWAY, 2015) 59
Figura 12 – Relação entre o fluxo solar F10.7 e o Número Internacional de Manchas Solares. Dados relativos a períodos anteriores ao ciclo solar 23 estão representados por alvéolos pretos, enquanto que aqueles obtidos após 1997, por alvéolos brancos. A linha vermelha é a relação proposta na equação 3.6. (HATHAWAY, 2015) 60
Figura 13 – Espectro de energia dos Raios Cósmicos (PORTUGAL, 2018) 63
Figura 14 – Variação no fluxo de RCG em dois ciclos solares consecutivos sobrepostos (BELOV, 2000) 64

Figura 15 – Relação entre o número médio de manchas solares e a variação no fluxo de RCG para quatro ciclos solares consecutivos (BELOV, 2000) 65
Figura 16 – Variações percentuais das médias diárias de cobertura de nuvens obtidas a partir de satélites geoestacionários sobre as áreas oceânicas entre 1984 e 1990 (curva mais espessa). A curva mais fina representa o fluxo médio normalizado de Raios Cósmicos obtido a partir do Centro de Monitoramento de Climax - Colorado/EUA (SVENSMARK e FRIIS-CHRISTENSEN, 1997) 72
Figura 17 – Composição de dados sobre cobertura de nuvens obtidos a partir de quatro satélites distintos (polígonos); fluxo de Raios Cósmicos obtido a partir de Climax - Colorado/EUA (linha contínua); fluxo solar F10.7 (linha pontilhada) (SVENSMARK, 2000) 73
Figura 18 – Distribuição geográfica das relações entre a incidência de Raios Cósmicos, Radiação Solar em UV e cobertura de nuvens de nível baixo. As faixas horizontais denotam a relação entre a cobertura de nuvens e a radiação em UV, enquanto que as faixas verticais, a correlação entre a cobertura de nuvens e o fluxo de Raios Cósmicos. A cor vermelha denota correlação positiva enquanto que a cor azul, correlação negativa (VOICULESCU ET AL, 2006) 74
Figura 19 – Distribuição geográfica das relações entre a incidência de Raios Cósmicos, Radiação Solar em UV e cobertura de nuvens de nível médio. As faixas horizontais denotam a relação entre a cobertura de nuvens e a radiação em UV, enquanto que as faixas verticais, a correlação entre a cobertura de nuvens e o fluxo de Raios Cósmicos. A cor vermelha denota correlação positiva enquanto que a cor azul, correlação negativa (VOICULESCU ET AL, 2006) 75
Figura 20 – Distribuição geográfica das relações entre a incidência de Raios Cósmicos, Radiação Solar em UV e cobertura de nuvens de nível alto. As faixas horizontais denotam a relação entre a cobertura de nuvens e a radiação em UV, enquanto que as faixas verticais, a correlação entre a cobertura de nuvens e o fluxo de Raios Cósmicos. A cor vermelha denota correlação positiva enquanto que a cor azul, correlação negativa (VOICULESCU ET AL, 2006) 75
Figura 21 – Deslocamento da AMAS entre os anos de 1900 e 2015, representado pelos triângulos vermelhos (FRIGO et al, 2018) 76
Figura 22 – Análise Wavelet para as séries temporais relativas ao ciclo de manchas solares de 11 anos e a temperatura nas cidade de Torres (a) e Iraí (b) (FRIGO et al, 2018) 77

Figura 23 – Análise Wavelet para as séries temporais relativas ao ciclo de manchas solares de 22 anos e a temperatura nas cidade de Torres (a) e Iraí (b) (FRIGO et al, 2018) 78
Figura 24 – Média anuais de radiação eletromagnética de longo comprimento de onda (entre 5 e 200 μm) e o efeito total das nuvens no fluxo radiativo dentro da atmosfera entre os anos de 1983 e 2001. As linhas pretas correspondem a curvas de nível de magnitude de campo magnético ao nível do solo para o ano de 1990 (VIEIRA e SILVA, 2006) 78
Figura 25 – Divisão da área de estudo conforme a intensidade do campo geomagnético. As regiões 1,2 e 3 possuem campo magnético mais intenso do que as regiões 4, 5 e 6, as quais estão sob a influência da AMAS (VIEIRA e SILVA, 2006) 79
Figura 26 – Mapa de correlação entre o fluxo de Raios Cósmicos e os efeitos anômalos causados pela cobertura de nuvens no equilíbrio radiativo das ondas curtas (VIEIRA e SILVA, 2006) 80
Figura 27 – Imagem do satélite GOES - 12 no dia 11 de Março de 2011 às 18 horas UTC, durante uma ocorrência de ZCAS 81
Figura 28 – Número de Manchas Solares e Emissão Solar em Rádio F10.7 para os ciclos solares 19 - 23 (1954 - 2008) (Fonte: O autor) 84
Figura 29 – Número de Manchas Solares e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Hermanus/África do Sul para os anos de 1958 à 2005 (Fonte: O autor) 84
Figura 30 – Transformadas Cruzada de Wavelet para as séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares (painel superior)/Emissão Solar F10.7 (painel inferior) e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Hermanus (Fonte: o Autor). 85
Figura 31 – Número de Manchas Solares e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Potchefstroom/África do Sul para os anos de 1971 à 2001 (Fonte: O autor) 86
Figura 32 – Transformadas Cruzada de Wavelet para as séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares (painel superior)/Emissão Solar F10.7 (painel inferior) e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Potchefstroom (Fonte: o Autor). 87
Figura 33 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Campo Grande/MS 87
Figura 34 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 88

Figura 35 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 89
Figura 36 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). 89
Figura 37 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 90
Figura 38 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Curitiba/PR 91
Figura 39 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 92
Figura 40 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 92
Figura 41 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 93
Figura 42 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 94
Figura 43 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Porto Alegre/RS 95
Figura 44 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 95
Figura 45 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 96

Figura 46 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 97
Figura 47 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Rio de Janeiro/RJ 98
Figura 48 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 98
Figura 49 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 99
Figura 50 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). 99
Figura 51 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 100
Figura 52 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Campo Grande/MS 101
Figura 53 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 102
Figura 54 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 102
Figura 55 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). 103

Figura 56 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial máxima em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 104
Figura 57 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Curitiba/PR 105
Figura 58 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 105
Figura 59 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 106
Figura 60 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 107
Figura 61 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 107
Figura 62 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Porto Alegre/RS 108
Figura 63 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 109
Figura 64 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 110
Figura 65 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). 110
Figura 66 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 111
Figura 67 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Rio de Janeiro/RJ 112

Figura 68 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 112
Figura 69 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 113
Figura 70 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 114
Figura 71 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 114
Figura 72 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Campo Grande/MS 115
Figura 73 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 116
Figura 74 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 117
Figura 75 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 117
Figura 76 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 118
Figura 77 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Curitiba/PR 119

Figura 78 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 119
Figura 79 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 120
Figura 80 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 120
Figura 81 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 121
Figura 82 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Porto Alegre/RS 122
Figura 83 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 123
Figura 84 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 123
Figura 85 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). 124
Figura 86 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 125
Figura 87 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Rio de Janeiro/RJ 125
Figura 88 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 126

Figura 89 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). 127
Figura 90 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). 127
Figura 91 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 128
Figura 92 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande/MS 129
Figura 93 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 129
Figura 94 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 130
Figura 95 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 131
Figura 96 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Campo Grande e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 131
Figura 97 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba/PR 132
Figura 98 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 133
Figura 99 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . . . 134

Figura 100 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . . . 134
Figura 101 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 135
Figura 102 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre/PA 136
Figura 103 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 136
Figura 104 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . . . 137
Figura 105 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . . . 138
Figura 106 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre/RS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 138
Figura 107 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro/RJ 139
Figura 108 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 140
Figura 109 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 140
Figura 110 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 141

Figura 111 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro/RJ e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 142
Figura 112 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande/MS 143
Figura 113 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 143
Figura 114 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . . . 144
Figura 115 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . . . 145
Figura 116 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Campo Grande e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 145
Figura 117 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba/PR 146
Figura 118 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 147
Figura 119 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . . . 147
Figura 120 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . . . 148
Figura 121 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 149
Figura 122 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS 149

Figura 123 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 150
Figura 124 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 151
Figura 125 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 151
Figura 126 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 152
Figura 127 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro 153
Figura 128 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 153
Figura 129 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . . . 154
Figura 130 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . . . 154
Figura 131 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 155
Figura 132 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Campo Grande/MS 156
Figura 133 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 157

Figura 134 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . . . 158
Figura 135 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . . . 158
Figura 136 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 159
Figura 137 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Curitiba/PR 160
Figura 138 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). 160
Figura 139 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . . . 161
Figura 140 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . . . 162
Figura 141 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Curitiba/PR e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 162
Figura 142 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Porto Alegre/RS 163
Figura 143 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 164
Figura 144 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 165

Figura 145 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 165
Figura 146 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Porto Alegre/RS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 166
Figura 147 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Rio de Janeiro/RJ 167
Figura 148 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro/RJ (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor). . 167
Figura 149 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro/RJ (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor). . 168
Figura 150 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro/RJ (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor). . 169
Figura 151 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Rio de Janeiro/RJ e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor). 169

Lista de tabelas

Tabela 1 – Algumas propriedades do Sol 45
Tabela 2 – Reação em cadeia próton - próton 47
Tabela 3 – Reação em cadeia Carbono - Nitrogênio 47
Tabela 4 – Propriedades do vento solar 56
Tabela 5 – Composição do ar seco atmosférico (SAHA, 2008) 66

Lista de abreviaturas e siglas

RCG - Raios Cósmicos Galácticos

EMC - Ejeção de Massa Coronal

UA - Unidade Astronômica

CMN - Centro de Monitoramento de Nêutrons

FAA - Federal Aviation Administration

NTSB - National Transportation Safety Board

CENIPA - Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aéreos

CFIT - Controlled Flight Into Terrain

FIR-SBCW - Região de Informação de Voo Curitiba

CINDACTA II - Segundo Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo

DTCEA - Destacamento de Controle de Espaço Aéreo

HRMS - Hermanus

PTFM - Potchefstroom

NOAA - Administração Nacional de Atmosfera e Oceanos

SoHO - Solar Heliospheric Observatory

RC - Raios Cósmicos

RCA - Raios Cósmicos Anômalos

RTS - Radiação Total do Sol

ISCCP - International Satellite Cloud Climatology Project

DMSP - Defense Meteorological Satellite Program

SSM/I - Special Sensor Microwave/Imager

UV - Ultravioleta

AMAS - Anomalia Magnética do Atlântico Sul

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

CCM - Complexos Convectivos de Mesoescalas

Sumário

1 INTRODUÇÃO 30
1.1 Aspectos Gerais e motivação 30
1.2 Objetivos 35
1.2.1 Objetivo Geral 35
1.2.2 Objetivos Específicos 35
1.3 Hipótese 36

2 METODOLOGIA 37
2.1 Área de estudo 37
2.2 Coleta de Dados 38
2.2.0.1 Dados relativos à atividade solar 38
2.2.1 Dados Relativos ao fluxo de Raios Cósmicos 38
2.2.2 Dados Atmosféricos 39
2.3 Análise de Dados 40
2.3.1 Ciclos Solares e Raios Cósmicos 40
2.3.2 Ciclos Solares e variáveis atmosférica 40
2.3.3 Análise Wavelet 41
2.3.3.1 Transformada Wavelet 41
2.3.3.2 Transformada Cruzada de Wavelet 43

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 45
3.1 O Sol: estrutura interna, atmosfera e vento solar 45
3.1.1 Estrutura interna do Sol 45
3.1.2 Atmosfera Solar 48
3.2 Atividade Solar: Campo Magnético e ciclos solares 49
3.2.1 Índices de Atividade Solar 51
3.2.1.1 Manchas Solares: Características e Número de Manchas Solares 51
3.2.1.2 Erupções Solares e Ejeções de Massa Coronal 54
3.2.1.3 Vento Solar 55
3.2.1.4 Radiação Solar 57
3.2.1.5 Fluxo Solar Rádio F10.7 59
3.3 Raios Cósmicos 60
3.3.1 Correlação entre o fluxo de Raios Cósmicos e os ciclos solares. 63
3.4 Atmosfera Terrestre 66
3.4.1 Aspectos gerais da atmosfera 66

3.4.2 Definição e formação de nuvens . . . 67
3.4.3 Efeitos dos Raios Cósmicos na Atmosfera . . . 69
3.4.3.1 Efeito dos Raios Cósmicos na Cobertura de Nuvens . . . 72
3.4.4 Aspectos climáticos da área de estudo . . . 80

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . 83
4.1 Séries temporais relativas à atividade solar e fluxo de Raios Cósmicos . . . 83
4.2 Temperatura Superficial Média . . . 86
4.2.1 Campo Grande . . . 86
4.2.2 Curitiba . . . 90
4.2.3 Porto Alegre . . . 94
4.2.4 Rio de Janeiro . . . 97
4.3 Temperatura Superficial Máxima . . . 100
4.3.1 Campo Grande . . . 100
4.3.2 Curitiba . . . 104
4.3.3 Porto Alegre . . . 107
4.3.4 Rio de Janeiro . . . 111
4.4 Temperatura Superficial Mínima . . . 115
4.4.1 Campo Grande . . . 115
4.4.2 Curitiba . . . 117
4.4.3 Porto Alegre . . . 121
4.4.4 Rio de Janeiro . . . 124
4.5 Umidade Relativa do Ar . . . 128
4.5.1 Campo Grande . . . 128
4.5.2 Curitiba . . . 132
4.5.3 Porto Alegre . . . 135
4.5.4 Rio de Janeiro . . . 139
4.6 Cobertura de Nuvens . . . 142
4.6.1 Campo Grande . . . 142
4.6.2 Curitiba . . . 146
4.6.3 Porto Alegre . . . 148
4.6.4 Rio de Janeiro . . . 152
4.7 Precipitação Total . . . 155
4.7.1 Campo Grande . . . 155
4.7.2 Curitiba . . . 159
4.7.3 Porto Alegre . . . 163
4.7.4 Rio de Janeiro . . . 166

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . 170

5.1 Ciclos Solares e fluxo de RCG 170
5.2 Ciclos Solares e Variáveis Atmosféricas 171
5.3 Propostas para trabalhos futuros 172

REFERÊNCIAS 173

1 Introdução

Na primeira seção desse capítulo serão apresentados, de forma resumida, os aspectos gerais do Sol e do ciclo solar, influência dos ciclos solares na penetração dos RCG - Raios Cósmicos Galácticos na heliosfera e os efeitos dos RCG na atmosfera terrestre. Feito isso, será apresentada a justificativa e motivação para esta pesquisa através da exposição de dados relacionados à fatores meteorológicos contribuintes para acidentes aéreos, assim como de dados relativos a cancelamento e atraso de voos nos principais aeroportos situados na área de estudo desse trabalho. Na segunda seção, serão expostos o objetivo geral e específicos desse trabalho. Por fim, na terceira seção, será mostrada a hipótese levantada nesse trabalho.

1.1 Aspectos Gerais e motivação

Com uma massa de aproximadamente $1,99 \times 10^{30}$ Kg, um raio próximo a $6,96 \times 10^{8}$ metros, magnitude igual a 4,8, aceleração gravitacional igual a 274 $m \cdot s^{-2}$, e temperatura superficial média de aproximadamente 5.785 Kelvins, o Sol é a principal fonte de energia do Sistema Solar e, subsequentemente, do Planeta Terra (PRIEST, 1997). Devido tanto a sua morfologia quanto ao seu comportamento dinâmico, o nível de atividade solar obedece a um ciclo de aumento e diminuição de sua atividade, o qual dura aproximadamente 11 anos, afetando assim a vida na Terra em vários aspectos. A maior incidência de partículas energéticas vindas do Sol durante os máximos solares podem causar danos aos satélites e naves espaciais nas órbitas terrestres, como também prejuízos à saúde de astronautas e tripulações de voos transpolares (HATHAWAY, 2015).

Tal comportamento cíclico é de origem magnética e se deve a um conjunto de processos ativos e não estacionários presentes na porção interna do Sol (RUŽDJAK ET AL, 2017) e (PORTUGAL, 2018). O principal e mais importante índice relacionado com o nível de atividade solar é o Número Internacional de Manchas Solares, o qual foi criado em 1848 por Rudolf Wolf e consiste na medida contínua mais extensa sobre o nível de atividade solar. Tais dados são, atualmente, fornecidos e mantidos pelo *Sunspot Index Data Center*, em Bruxelas/Bélgica, onde atualizações mensais estão disponíveis de forma *on-line* (HATHAWAY, WILSON e REICHMANN, 2002). Além do Número de Manchas Solares, existem outros dados disponíveis para a análise do nível de atividade solar, tais como o fluxo solar F10.7, quantidades de Erupções Solares (também conhecidas como *Flares*) e EMC - Ejeção de Massa Coronal, concentração de isótopos de Carbono - 14 e

Berílio - 10 em anéis de crescimento das árvores e camadas de gelo nos polos, e penetração de Raios Cósmicos Galácticos que penetram a alta atmosfera (HATHAWAY, 2015).

A intensidade de fluxo de RCG que adentra o Sistema Solar varia em função do tempo devido às flutuações ocorridas no campo magnético do Sol, o qual permeia toda uma cavidade conhecida como Heliosfera (que se estende em até 100 UA - Unidade Astronômica[1], formada no meio interestelar pelo vento solar que flui radialmente para fora do Sol, e é majoritariamente governada pelo campo magnético solar.), onde todos os astros do Sistema Solar estão contidos (USOSKIN ET AL, 2011). Raios Cósmicos Galácticos consistem em partículas como Elétrons e Núcleos Atômicos os quais são energizados a níveis da ordem de 10^9 eV em ondas de choque produzidas nas explosões de *Super Novas*. Partículas carregadas positivamente desencadeiam uma quantidade de reações capazes de produzir um conjunto de outras partículas na alta atmosfera. Tais partículas se precipitam em direção à Terra na forma de cascata, a qual pode ser detectada por Centros de Monitoramento de Nêutrons (CMN) (HATHAWAY, 2015).

A medida em que o Número de Manchas Solares aumenta, a contagem de Nêutron feita a partir dos CMN - Centro de Monitoramento de Nêutrons diminui. Essa correlação negativa deve-se à estrutura mais desordenada das linhas de campo magnético do Sol, as quais são capazes de espalhar as partículas de RCG que viajam ao longo da Heliosfera (PARKER, 1965 *apud* HATHAWAY, 2015). Além disso, durante os meses de elevada atividade solar, linhas de campo magnético "congeladas"são transportadas radialmente para longe do cerne do Sistema Solar pelos ventos solares. Tais linhas de campo também são capazes de espalhar essas partículas externas, diminuindo o seu fluxo dentro da Heliosfera (HATHAWAY, 2015).

Ao penetrarem na atmosfera terrestre, os RCG produzem efeitos significativos no clima ao ionizar moléculas gasosas que estão em suspensão, convertendo-as em aerossóis e nos chamados Núcleos de Condensação (FERNANDES, 2017). Um exemplo desse tipo de interação entre as partículas extraterrestre e as moléculas presentes nos gases atmosférico é a síntese do isótopos C^{14} e Be^{10} na estratosfera a partir do impacto de RCG nas moléculas de N^{14} e O^{16} (HATHAWAY, 2015). Esses Núcleos de Condensação consistem de pequenas partículas, tais como sal marinho, poeira e fuligens oriundas da queima dos combustíveis fósseis. Uma vez que algumas dessas partículas possuem afinidade com as moléculas de H_2O, elas são capazes de induzir processos de condensação e sublimação, até mesmo em condições onde o ar não esteja saturado (FAA - Federal Aviation Administration, 1975).

Um dos primeiros e principais estudos sobre os possíveis efeitos do ciclo de atividade solar sobre o clima na Terra foi feito por Svensmark e Friis-Christensen (1996), onde eles

[1] Unidade Astronômica: Distância média entre a Terra e o Sol. 1 UA = $1,5 \times 10^{11}$ metros

puderam observar uma correlação positiva entre o fluxo de RCG que penetra na atmosfera e dados de satélites geoestacionários referentes a cobertura de nuvens nas áreas oceânicas. Conforme Stull (2015), as nuvens consistem de porções de ar atmosférico saturado, onde gotículas de água e cristais de gelo manifestam-se de maneira visível em suspensão e que possuem efeito direto no equilíbrio radiativo da atmosfera, afetando assim algumas variáveis meteorológica, como por exemplo, temperatura (SAHA, 2008) e (LIOU, 2002).

Uma vez que todo e qualquer voo evolui ao longo da atmosfera terrestre, a meteorologia e a aviação são duas atividades humanas intrinsecamente relacionadas. Muitos estudos têm mostrado como a meteorologia tem fortes impactos tanto na aviação civil como na militar (GULTEPE ET AL. 2019). Segundo o NTSB - National Transportation Safety Board[2] (2010), os fenômenos atmosféricos que causam ou contribuem para os acidentes aeronáuticos são vento, teto/visibilidade, elevada altitude densidade, turbulências, formação de gelo no carburador, precipitação, rajadas ascendentes e descendentes, formação de gelo, trovoadas, cisalhamento de vento (também conhecido como tesoura de vento ou *windshear*) e outros. Entre os anos de 2003 e 2007, $20,1\%$ dos acidentes aeronáuticos ocorridos nos Estados Unidos tiveram como causa ou fator contribuinte as condições meteorológicas (NTSB, 2010). De acordo com o Sumário Estatístico de Acidentes Aeronáuticos, emitido pelo CENIPA - Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aéreos, entre os anos de 2010 e 2019, ocorreram 67 acidentes com aviões de asa fixa, cujo fator contribuinte foram condições meteorológicas adversas (BRASIL, 2020)

Condições de baixa visibilidade e de alta cobertura de nuvens a baixa altura (também conhecido como teto baixo) estão em segundo lugar entre os fatores meteorológicos responsáveis ou contribuintes para ocorrência de acidentes aeronáuticos nos EUA (NTSB, 2010). Tais condições são mais propícias às ocorrências de CFIT - Controlled Flight Into Terrain[3], definido como uma colisão não intencional com o terreno logo abaixo (solo, superfície de água, montanha, ou qualquer outro obstáculo) enquanto a aeronave está sob voo controlado. Na maioria das vezes, durante os momentos antecedentes a um CFIT, o piloto ou a tripulação de voo não está em estado de consciência situacional com relação ao ambiente onde a aeronave está sobrevoando, tomando ciência do perigo iminente apenas quando não há mais tempo hábil para manobras evasivas. Esse tipo de ocorrência é mais comum de acontecer durantes as fases de aproximação e pouso (FAA, 2018).

Dentre os casos de acidentes aéreos ocorridos na região de juridição da FIR-SBCW - Região de Informação de Voo Curitiba e provocados por condições meteorológicas desfavoráveis ao voo em condições visuais, tem-se aquele ocorrido com a aeronave que estava

[2] Comitê Nacional de Segurança nos Transportes - Órgão responsável pela investigação de acidentes aéreos no Estados Unidos da América

[3] Controlled Flight Into Terrain - Voo controlado em direção ao solo.

transportando o então ministro do Supremo Tribunal Federal Teori Zavascki. Conforme o Relatório Final emitido pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes - CENIPA, no dia 17 de Janeiro de 2017, a aeronave de modelo C90GT e matrícula PR-SOM adentrou em condições meteorológicas de baixa visibilidade durante o procedimento de aproximação visual no aeródromo de Paraty/RJ. Tais condições atmosféricas fizeram com que o piloto da aeronave perdesse o contato visual com terreno subjacente e consequentemente, sua consciência situacional quanto a região em sobrevoo. Isso acarretou na perda de controle e colisão da aeronave na água (BRASIL, 2018).

Outra condição meteorológica que pode trazer prejuízos à atividade aérea é a presença de **trovoadas**. De acordo com FAA (1975), as trovoadas ocorrem durante o ano inteiro, nas regiões tropicais, durante a primavera, verão e outono nas latitudes temperadas, e ocasionalmente no verão, para as regiões polares. A característica visual mais evidente de uma trovoada é a presença de nuvens do tipo cúmulus, as quais possuem um extenso desenvolvimento vertical. Os principais riscos trazido pelas trovoadas às aeronaves são as intensas turbulências, formação de gelo na aeronave e descargas elétricas (FAA, 1975). De 2.223 acidentes aéreos citados nos EUA, 114 tiveram como fator contribuinte turbulências, 64, formação de gelo, e 4, descargas elétricas (NTSB, 2010).

Desses três casos citados, aquele que pode oferecer maiores riscos à segurança de voo é a formação de gelo. Temperaturas menores que 0 Celsius combinada com a presença de umidade favorecem a formação de gelo na estrutura da aeronave. Massas de gelo presas as superfícies das aeronaves podem provocar o descolamento do fluxo de ar sobre o extradorso das asas, reduzindo assim a sustentação e aumentando a força de arrasto aerodinâmico, fazendo com que a aeronave entre em condições de *stall* em ângulos de ataque menores e velocidades maiores. Além disso, a formação de gelo pode ocorrer nas entradas de ar dos motores, bloqueando o fluxo de ar que entra no motor, provocando assim uma pane (NTSB, 2010).

Diante dessa perspectiva, essa pesquisa pretendeu buscar os possíveis efeitos meteorológicos causados pelas variações da atividade solar dentro da FIR SBCW. Atualmente, FIR SBCW cobre todos os estados da Região Sul, os estados do Rio de Janeiro e Mato Grosso do Sul, e parte do estado de São Paulo. Dos vinte principais aeroportos do país no ano de 2020, sete encontram-se na juridição da FIR Curitiba: São Paulo - Guarulhos (SBGR), São Paulo - Congonhas, Rio de Janeiro - Santos Dumont, Porto Alegre, Rio de Janeiro - Galeão, São José do Pinhais (Região metropolitana de Curitiba) e Florianópolis (BRASIL, 2020).

Durante o ano de 2019, a participação dos aeroportos situados em São Paulo na quantidade de decolagens para voos domésticos foi de $23,3\%$, dos aeródromos situados

no Rio de Janeiro foi $9,4\%$ e das três capitais da Região Sul foi de $9,2\%$, totalizando assim um percentual de $41,9\%$. Quanto ao total absoluto de decolagens, os Aeroportos de Congonhas e Guarulhos registraram um quantitativo somado de 187.404 decolagens, o estado do RJ, um total de 76.492 decolagens, a Região Sul, 110.413, e Mato Grosso do Sul, 8.068 decolagens. Referente ao número de pessoas embarcadas, os aeroportos de São Paulo registraram 24.963.390 pessoas, o estado do Rio de Janeiro, 9.160.632 passageiros, os estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, um total de 9.289.667 passageiros embarcados, e o estado do Mato Grosso do Sul, um total de 825.309 pessoas (BRASIL, 2019).

Das vinte principais rotas domésticas nacionais, dez delas ocorrem integralmente na área de jurisdição da FIR Curitiba, sendo a principal delas a rota Congonhas - Santos Dumont, popularmente conhecida como ponte aérea. No ano de 2019, essa rota registrou um percentual de $7,0\%$ de atrasos maiores que 30 minutos, e $2,1\%$ de atrasos maiores que 1 hora. Quanto ao cancelamento de voos, o percentual nesse ano foi de $3,5\%$ para essa rota. Em relação aos voos saindo de Curitiba, foi registrado um percentual de atraso maior que 30 minutos de $6,3\%$ e $7,3\%$ para os voos entre a capital paranaense e os Aeroportos de Congonhas e Guarulhos, respectivamente. Quanto a Porto Alegre, os voos ligando essa cidade e os dois aeroportos de São Paulo registraram um percentual de $6,9\%$ e $7,5\%$ de atrasos maiores que 30 minutos (BRASIL, 2019).

Em função da pandemia de COVID-19, o ano de 2020 foi caracterizado por uma significativa diminuição no número de voos e passageiros embarcados. O estado do Rio de Janeiro registrou um total de 36.642 decolagens, os aeroportos de São Paulo, 89.994, a região Sul, 48.026 e o estado do Mato Grosso do Sul, 3.866 decolagens. Em relação a quantidade de pessoas embarcadas, o estado do RJ registrou um total de 4.160.972, os aeroportos de Congonhas e Guarulhos 11.298.763 passageiros, 376.275 pessoas no MS, e 5.192.562 na região Sul. Em relação ao número de atrasos e cancelamentos, a rota Santos Dumont - Congonhas registrou um percentual de $4,3\%$ de atrasos superiores a 30 minutos e $1,5\%$ de atrasos maiores do que 1 hora. A rota Guarulhos - Porto Alegre registrou um percentual de $4,4\%$ de atrasos maiores que 30 minutos, e $1,5\%$ para atrasos superiores a 1 hora. Por fim, a rota Curitiba - Guarulhos teve um percentual de atraso $5,1\%$ (maior que 30 minutos) e $2,1\%$ (maior que 1 hora) (BRASIL, 2020).

É importante ressaltar que a região de jurisdição da FIR SBCW é constantemente palco de condições climáticas severas, servindo como porta de entrada para as frentes frias (DECEA,2021). Passagens das frentes frias são caracterizadas por instabilidades atmosféricas, acarretando a presença de nuvens cumuliformes, células de trovoadas, fortes precipitações, turbulências intensas e formação de gelo nas altas altitudes. Após a passagem de uma frente fria, é comum a ocorrência de nevoeiro e baixa visibilidade (FAA,

1975). A ocorrência dos nevoeiros é um dos principais fatores responsáveis pelos atrasos e cancelamentos de voos na região Sul do país (FRANÇA, QUEIROZ e CARVALHO, 200?).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desse trabalho foi buscar os possíveis efeitos meteorológicos provocados pelas variações de atividade solar, durante o período de 1954 à 2008 (i.e durante os ciclos solares 19, 20, 21, 22 e 23), na área de jurisdição da FIR SBCW.

1.2.2 Objetivos Específicos

O Objetivo Geral dessa pesquisa foi atingido através dos Objetivos Específicos detalhados a seguir:

I Levantar o comportamento dos ciclos solares 19, 20, 21, 22 e 23 através da coleta e análise de dados mensais relativos ao Número de Manchas Solares e Emissão Solar F10.7 durante o período compreendido entre Janeiro de 1954 e Dezembro de 2008.

II Coletar e analisar dados mensais referentes à precipitação de RCG observados a partir dos CMN de Hermanus (entre os anos de 1958 e 2005) e Potchefstroom (entre os anos de 1971 e 2001), os quais estão localizados na África do Sul e, portanto, dentro da faixa latitudinal onde se encontra a FIR-SBCW.

III Avaliar o grau de coerência entre as séries temporais citadas nos Objetivos I e II, assim como tais séries se correlacionam, buscando, desse modo, analisar os efeitos dos ciclos solares no fluxo de RCG dentro da faixa latitudinal onde se encontra a região de jurisdição da FIR-SBCW.

IV Coletar dados mensais referentes às Temperaturas Superficiais Médias, Máximas e Mínimas, Umidade Relativa do Ar, Cobertura de Nuvens e Precipitação Total para os municípios de Campo Grande, Curitiba, Porto Alegre e Rio de Janeiro, durante o período compreendido entre Janeiro de 1954 e Dezembro de 2008.

V Reconstruir as séries temporais citadas no Objetivo IV para as escalas de período de 64, 128 e 256 meses.

VI Avaliar o grau de coerência entre as séries citadas nos Objetivos I e IV, assim como tais séries se correlacionam, buscando, assim, analisar as correlações entre os ciclos solares e as condições meteorológicas nos municípios citados no Objetivo IV.

1.3 Hipótese

Diante disso, esse pesquisa visa responder a seguintes pergunta: As variações nos níveis de atividade solar podem provocar algum efeito meteorológico dentro da região de jurisdição da FIR Curitiba?

2 Metodologia

Neste capítulo está descrito toda a metodologia aplicada nessa pesquisa. A primeira seção descreve sobre a área de jurisdição da SBCW-FIR, cita os estados brasileiros os quais ela está sobrejacente e os órgão de Controle de Tráfego Aéreo responsável pela gerenciamento das aeronaves que a sobrevoa. Na segunda seção está descrito sobre a coleta dos dados relativos ao Número de Manchas Solares, Emissão Solar F10.7, fluxo de RCG e dados meteorológicos. Já na terceira seção discrimina-se sobre os procedimentos e métodos utilizados para o processamento e análise desses dados, assim como as técnicas utilizadas para a análise de correlações entre as séries relacionadas à atividade solar com o fluxo de RCG e dados meteorológicos.

2.1 Área de estudo

De acordo com a Força Aérea Brasileira, a área de jurisdição da FIR Curitiba encontra-se sob o gerenciamento do CINDACTA II - Segundo Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo, conforme prevê o Decreto n^o 87.758, de 01 de Novembro 1982. Desse modo, o CINDACTA II, presta serviço de gerenciamento de tráfego aéreo, defesa aérea, informação de voo, meteorologia, telecomunicações e buscas e salvamentos, dentro dos espaços aéreos sobrejacentes aos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e partes dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás e Espírito Santo (BRASIL, [200-?]), conforme mostra a figura 1

O CINDACTA II localiza-se no Aeroporto de Bacacheri, Curitiba/PR, e atualmente conta com um Centro de Controle de Área (ACC), sete Controles de Aproximação (APP), oito Torres de Controle de Aeródromo (TWR), além de Estações de Telecomunicações Aeronáuticas e Estações Permissionárias, distribuídos pela sua sede e pelos Destacamentos sob a sua jurisdição. Quanto a esses DTCEA - Destacamento de Controle de Espaço Aéreo, o CINDACTA II conta com 15 unidades instaladas nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul, sendo os mais importantes o DTCEA-CT (Curitiba), DTCEA-FL (Florianópolis), DTCEA-PA (Porto Alegre), DTCEA-CG (Campo Grande) e DTCEA-FI (Foz do Iguaçu) (BRASIL, [200-?]).



Figura 1 – Regiões de Informações de Voo que compõe o espaço aéreo brasileiro. Imagem tirada do link: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Departamento_de_Controle_do_Espaço_Aereo>

2.2 Coleta de Dados

2.2.0.1 Dados relativos à atividade solar

Para a análise dos ciclos de atividade solar, foram coletadas dados mensais relativos ao Número de Manchas Solares a partir do banco de dados do *World Data Center for Solar-Terrestrial Physics*, o qual é mantido e disponibilizado pelo Departamento de Pesquisa em Física Solar do Observatório Real da Bélgica, podendo ser acesso pelo endereço:<http://www.wdcb.ru/stp/sunspots.html> . Tais dados são válidos para os ciclos solares 19, 20, 21, 22 e 23, ou para os anos entre 1954 e 2008. Uma vez que o Número de Manchas Solares tem a desvantagem de ser uma variável discreta, também foram coletados dados mensais relacionados a emissão solar em rádio F10.7, a partir do banco de dados citado anteriormente, e também válidos para os ciclos 19 à 23. Tais dados podem ser acessados pelo endereço: <http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_flux.html>.

2.2.1 Dados Relativos ao fluxo de Raios Cósmicos

Para Analisar o efeito dos ciclos solares na penetração de partículas de Raios Cósmicos dentro da faixa latitudinal onde encontra-se a região de jurisdição da FIR Curitiba, foram coletados dados mensais relativos ao fluxo de RC observados nas estações de monitoramento de nêutrons de HRMS - Hermanus e PTFM - Potchefstroom, ambas

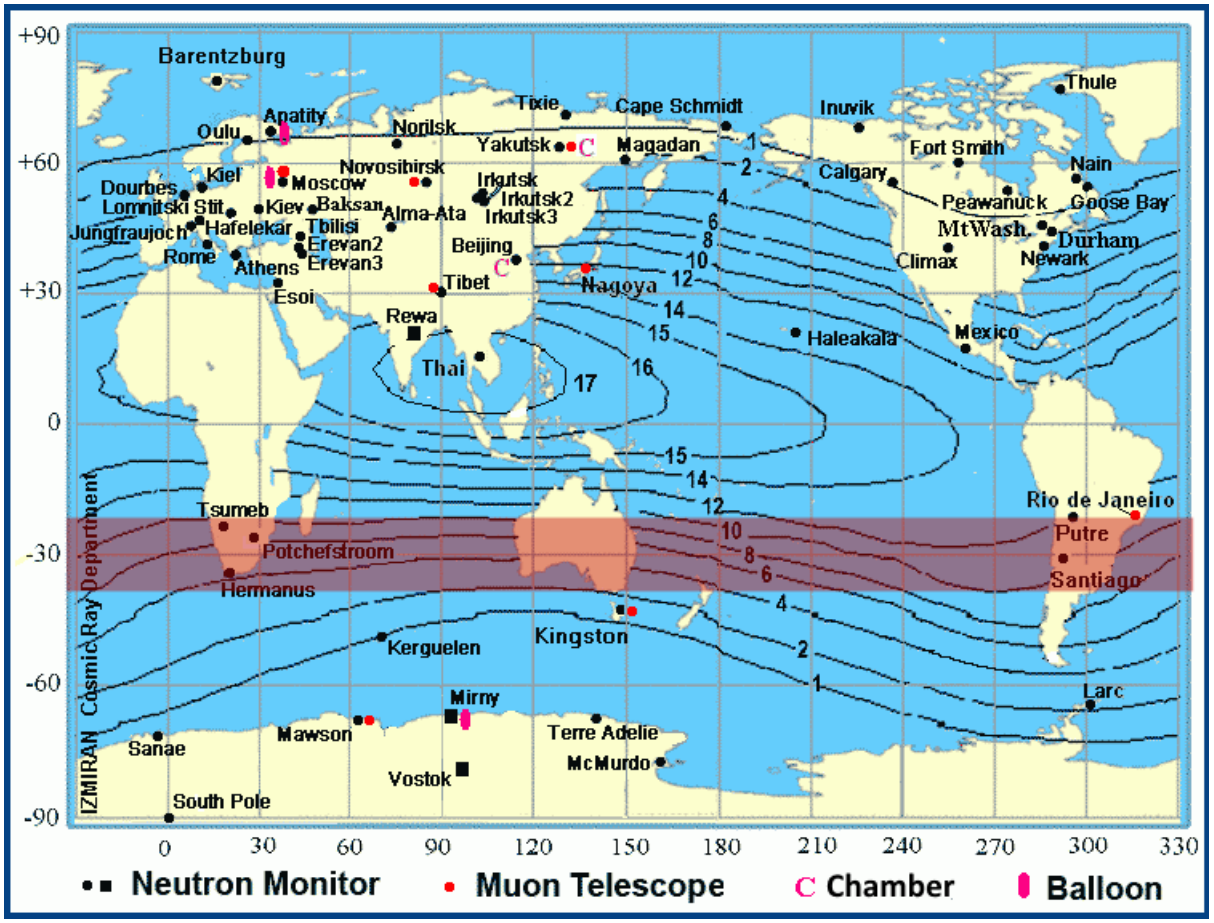


Figura 2 – Distribuição das estações de monitoramento de nêutrons ao redor do mundo, com ênfase nas utilizadas para essa pesquisa. Imagem tirada do link: <http://www.wdcb.ru/stp/cosmic_rays/cosmic_rays.html>

localizadas na África do Sul. A estação HRMS localiza-se nas coordenadas $34,14^{o}$ Sul e $19,22^{o}$ Oeste, a uma altitude de 26 metros acima do nível do mar, enquanto que a estação PTFM situa-se nas coordenadas $26,68^{o}$ Sul e $27,92^{o}$ Oeste, a uma altitude de 1.351 metros. A rigidez de corte da região onde localiza-se HRMS é equivalente a 4,90 GeV, enquanto que, para a estação de PTFM, 7,3 GeV. Os dados coletados de HRMS são válidos para os anos entre 1958 e 2005, enquanto que, os relativos a PTFM, para os anos de 1971 à 2001. Ambas as estações encontram-se dentro da faixa latitudinal onde encontra-se a jurisdição da FIR Curitiba, conforme mostra a figura 2. Tais dados foram coletados a partir do link: <http://www.wdcb.ru/stp/cosmic_rays/cosmic_rays.html>.

2.2.2 Dados Atmosféricos

Para avaliar as condições atmosféricas durante o período desse estudo, foram coletadas séries temporais relativas às temperaturas médias, mínimas e máximas, umidade relativa, cobertura de nuvens e precipitação, para as cidades de Campo Grande, Curitiba, Porto Alegre e Rio de Janeiro, a partir do banco de dados do NCEP/NOAA, disponíveis em: <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/db_search/SearchMenus.pl>, e válidas para o período

dos ciclos solares supracitados.

2.3 Análise de Dados

2.3.1 Ciclos Solares e Raios Cósmicos

Coletados os dados relacionados aos índices de atividade solar e penetração de raios cósmicos, foram confeccionados gráficos a partir de tais dados, utilizando o pacote ggplot2, disponível para a linguagem de programação R. Em posse de tais gráficos, foi realizado uma análise visual preliminar das variações solares e penetração de raios cósmicos, buscando encontrar de forma visual as suas correlações. Após a confecção e análise desses gráficos, os dados relativos aos índices de atividade solar e fluxo de raios cósmicos foram submetidos a Análises de Coerência Wavelet, onde investigou-se o grau de correlação entre as variáveis.

2.3.2 Ciclos Solares e variáveis atmosférica

Após verificar o efeito modulatório do ciclo solar sobre o fluxo de raios cósmicos dentro da faixa latitudinal onde encontra-se a região de jurisdição da FIR Curitiba, as séries temporais relativas às condições atmosféricas foram plotadas graficamente, permitindo assim a visualização de um panorama geral de como elas variaram ao longo dos ciclos solares. Feito isso, aplicou-se a função *reconstruct*, disponível no pacote **WaveletComp** do R, para cada uma dessas séries temporais atmosféricas, permitindo assim reconstruir tais dados para as escalas de períodos de 64, 128 e 256 meses, além de observar os seus modos de variação para cada uma dessas escalas de período. A função *reconstruct* reconstitui uma determinada série temporal a partir da decomposição Wavelet, podendo ser utilizada para uma filtragem seletiva dos modos variacionais dessa série, permitindo, desse modo, a análise da periodicidade desejada, somente (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018). Uma vez reconstituída, essas séries foram observadas em paralelo com o Número de Manchas Solares com o objetivo de avaliar de forma visual se elas variam em fase ou em oposição de fase. Por fim, aplicou-se a Análise de Coerência Wavelet entre as variáveis atmosféricas e os índices de atividade solar, onde avaliou-se o grau de coerência espectral entre as séries, assim como a diferença angular de fase, conforme será descrito a seguir.

2.3.3 Análise Wavelet

2.3.3.1 Transformada Wavelet

Conforme Torrence e Compo (1997) e Rösch e Shmidbauer (2018), as Análises Wavelet têm se tornado uma ferramenta bastante útil na análise de séries temporais, especialmente naquelas que apresentam potenciais variações de frequência ao longo do tempo. Ao fazer a decomposição de uma série dentro do domínio tempo-frequência, torna-se viável determinar os modos dominantes de variação, assim como tais modos evoluem ao longo do tempo (TORRENCE e COMPO, 1997). Conforme Rocha (2018), as Análises Wavelet tiveram origem a partir dos trabalhos de A. Haar, e posteriormente de Alex Grossman, Jean Morlet e Ingrid Daubechies (ROCHA, 2018). Tal metodologia já tem sido utilizada em estudos na área da geofísica, climatologia, oceanografia (TORRENCE e COMPO, 1997), e mais recentemente, na economia (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018).

Dentre os inúmeros pacotes disponíveis para o software R, o **WaveletComp** analisa a estrutura de frequência de séries uni ou bi-variadas, a partir da Wavelet de Morlet $\psi(t)$, cuja forma implementada nesse pacote é dada por (TORRENCE e COMPO, 1997; RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \cdot e^{i \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot \frac{1}{\sqrt{e^{t^2}}} \tag{2.1}$$

O parâmetro ω_0 presente na equação 2.1 denota a **frequência angular** e, por definição, é igual a 6. Uma vez que um ciclo completo equivale a 2π, o período medido em unidade de tempo é igual à $2\pi \cdot 6^1$ (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018). A função $\psi(t)$ mostrada na equação 2.1 atua como uma "função fundamental", ou, em outras palavras, "função mãe", a partir da qual diversas funções serão geradas. Desse modo, sendo $x(t)$ uma sequência discreta de dados, define-se como **Transformada Contínua de Wavelet** a convolução de $x(t)$ com um conjunto de funções derivadas da função $\psi(t)$ em 2.1, as quais são obtidas pela translação temporal τ e pelo escalonamento s do tempo (TORRENCE e COMPO, 1997) e (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$W_n(\tau, s) = \sum_{n=0}^{N-1} x(t) \cdot \frac{1}{\sqrt[2]{s}} \cdot \psi^* \left[\frac{t - \tau}{s} \right] \tag{2.2}$$

Onde o termo ψ^* denota o complexo conjugado da função $\psi(t)$, o termo s o fator de dilatação e τ o de translação. Desse modo, a posição particular de uma "Wavelet filha"no domínio de tempo é determinada ao se localizar o parâmetro τ deslocado em uma variação δt. Já a escolha do valor de s determina a cobertura Wavelet das séries dentro do domínio de frequência. O valor de s, por definição, é uma fração cujo denominador é dado por uma potência de 2 (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$s_j = s_0 2^{j \cdot \delta j}, j \in [0, J] \tag{2.3}$$

O s_0 denota a menor escala possível, enquanto que J a maior escala, sendo dada por (TORRENCE e COMPO, 1997):

$$J = \delta j^{-1} \log_2 \left(\frac{N \delta t}{s_0} \right) \tag{2.4}$$

Para tornar a transformada mais próxima o possível do real, a convolução mostrada na equação 2.2 deve ser efetuada N vezes, onde N equivale a quantidade de pontos dessa série temporal (TORRENCE e COMPO, 1997).

De acordo com Rösch e Shmidbauer (2018), a amplitude de um componente periódico da série temporal investigada, assim como ela se modifica ao longo do tempo, pode ser obtida a partir do módulo da Transformada Wavelet dessa série temporal. No pacote WaveletComp, ela é dada por (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$A(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt[2]{s}} \cdot |W_n(\tau, s)| \tag{2.5}$$

Elevando a equação 2.5 ao quadrado, obtém-se a Potência Wavelet, a qual pode ser interpretada como a densidade de energia dentro do espaço tempo-frequência. Podendo também ser chamada de Espectro de Potência Wavelet, ela é dada por (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$P(\tau, s) = (A(\tau, s))^2 = \frac{1}{s} \cdot |W_n(\tau, s)|^2 \tag{2.6}$$

2.3.3.2 Transformada Cruzada de Wavelet

Entende-se por **Transformada Cruzada de Wavelet** como uma ferramenta capaz de comparar o conjunto de frequências contidas em um par de séries temporais de dados, ou um par de sinais, assim como delinear conclusões a respeito do nível de sincronicidade entre esses dois sinais, dentro de uma determinada escala de período e em um dado intervalo de tempo. Sendo $x(t)$ e $y(t)$ duas séries temporais dentro de um intervalo I, $W_n^x(\tau, s)$ e $W_n^y(\tau, s)$ as suas respectivas transformadas Wavelet, o pacote WaveletComp obtém a **Transformada Cruzada de Wavelet** a partir da seguinte fórmula (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$W_n^{xy}(\tau, s) = \frac{1}{s} \cdot W_n^x(\tau, s) \cdot W_n^{y^*}(\tau, s) \tag{2.7}$$

Calculando o módulo da equação 2.7 obtém-se a Potência Cruzada Wavelet, a qual, mesmo com algumas limitações, pode ser utilizada para a avaliação da similaridade das Potências Wavelet das séries $x(t)$ e $y(t)$ dentro do domínio tempo-frequência (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$P_{xy}(\tau, s) = \sqrt[2]{(W_n^{xy}(\tau, s))^2} \tag{2.8}$$

Associado a concepção de Transformada Cruzada de Wavelet tem-se a Coerência Wavelet como uma forma de se medir o quanto a variabilidade em uma série $x(t)$ produz variações em outra série $y(t)$ (FERNANDES, LÚCIO e FERNANDEZ, 2017). Rocha (2018) afirma que Coerência Wavelet constitui o espectro normalizado da Transformada Cruzada de Wavelet, suavizado tanto no tempo como na escala, pelo espectro de energia de cada Transformada Wavelet (ROCHA, 2018). Além disso, os coeficientes do Espectro da Transformada Cruzada de Wavelet são capazes de mostrar a presença de elevados níveis de correlação entre as séries $x(t)$ e $y(t)$.Tais coeficientes são estimadores qualitativos do comportamento temporal do grau de linearidade da interação entre essas duas séries, em uma dada periodicidade (ROCHA, 2018). O grau de coerência é dado por (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$R = \frac{sW_n^{xy}(\tau, s)}{\sqrt[2]{sP_x \cdot sP_y}} \tag{2.9}$$

$$R^2 = \frac{(sW_n^{xy}(\tau, s))^2}{sP_x \cdot sP_y} \tag{2.10}$$

O prefixo s presentes nas equações 2.9 e 2.10 indicam que os termos foram suavizados. O grau de coerência entre as duas séries é indicado pelo quadrado de R, conforme mostra a equação 2.10, e varia entre 0 e 1, de modo que, quanto mais próximo a 1, maior o grau de coerência observada entre as séries (FERNANDES, LÚCIO e FERNANDEZ, 2017) e (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018). Uma vez que essas séries são decompostas na forma de ondas, a maneira como as duas séries se relacionam se mede através do ângulo de fase ($\alpha(\tau, s)$) entre as ondas e pode ser obtido pelo argumento da Transformada Cruzada de Wavelet (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018):

$$\alpha(\tau, s) = \arg(W_n^{xy}(\tau, s)) \tag{2.11}$$

Valores angulares situados no primeiro e quarto quadrante do círculo trigonométrico indicam que as duas séries estão variando em fase, ou seja os seus máximos e mínimos coincidem entre si, ao passo que, ângulos situados no segundo e terceiro quadrante indicam que elas estão em oposição de fase, isto é, o máximo da primeira coincide com o mínimo da segunda, e vice-versa (RÖSCH e SHMIDBAUER, 2018). Já para todo $\alpha = 90^o$ ou $\alpha = 270^o$, observa-se uma relação não linear entre as séries (FRIGO ET AL, 2018). Graficamente, o pacote WaveletComp mostra o grau de coerência entre as séries, para uma dada periodicidade e em um intervalo de tempo, através de uma paleta de cores, onde as regiões avermelhadas indicam um grau de coerência mais elevado, ao passo que regiões mais azuladas, um baixo nível de coerência. Já o ângulo de fase é representado por setas, de modo que aquelas voltadas para o lado direito indicam ângulos situados no primeiro ou quarto quadrante, ao passo que, as setas voltadas para a esquerda, ângulos localizados no segundo o terceiro quadrante.

3 Fundamentação Teórica

Este capítulo descreve todo o embasamento teórico dessa pesquisa. Na primeira seção, descreve-se as características gerais do Sol, toda a sua estrutura interna assim como a atmosfera solar. Na segunda seção discorre-se sobre o campo magnético solar, assim como a sua dinâmica, a origem e processos físicos relacionados aos ciclos solares e os principais índices associados ao ciclo de atividade solar. Na terceira seção desse capítulo, explica-se os aspectos gerais dos RCG, a sua origem, composição e interação com o campo magnético solar, justificando, desse modo, como os ciclos solares se correlacionam com o fluxo de RCG dentro do Sistema Solar. Na quarta seção, descreve-se sobre os aspectos gerais da atmosfera, assim como as suas características físicas e químicas. Nessa seção, também se descreve como o fluxo de RCG afeta diretamente na cobertura de nuvens, além de alguns aspectos meteorológicos relevantes dentro região de estudo.

3.1 O Sol: estrutura interna, atmosfera e vento solar

3.1.1 Estrutura interna do Sol

Formada a aproximadamente 4,6 bilhões de anos, o Sol é uma estrela de secunda geração (G2) na hierarquia cosmológica, formada majoritariamente por Hidrogênio e Hélio, somado com alguns elementos mais pesados tais como Carbono, Nitrogênio, Neônio, Ferro, Silício, Magnésio, Enxofre e Cálcio (LIOU, 2002). O Hidrogênio e o Hélio perfazem, respectivamente, 90% e 10% da massa total do Sol (LIOU, 2002), (PRIEST, 1997) e (SAHA, 2002). Segue abaixo algumas das principais características do Sol (PRIEST, 1997):

Massa	m $= M_\odot$	$1,989 \times 10^{30}$ Kg
Raio	r $= R_\odot$	$6,96 \times 10^{8}$ m
Densidade Média	ρ_{med}	1409 $kg \cdot m^{-3}$
Densidade Central	ρ_c	$1,6 \times 10^{8}$ $kg \cdot m^{-3}$
Luminosidade	$L = L_\odot$	$3,9 \times 10^{26}$ W
Temperatura Efetiva	T_e	5785 K
Temperatura Central	T_c	$1,5 \times 10^{7}$ K
Magnitude Visual Absoluta	M_v	4.79

Tabela 1 – Algumas propriedades do Sol

A estrutura do Sol pode ser compreendida como uma massiva esfera gasosa, na qual todas as partículas são mantidas e comprimidas devido a sua intensa ação gravitacional

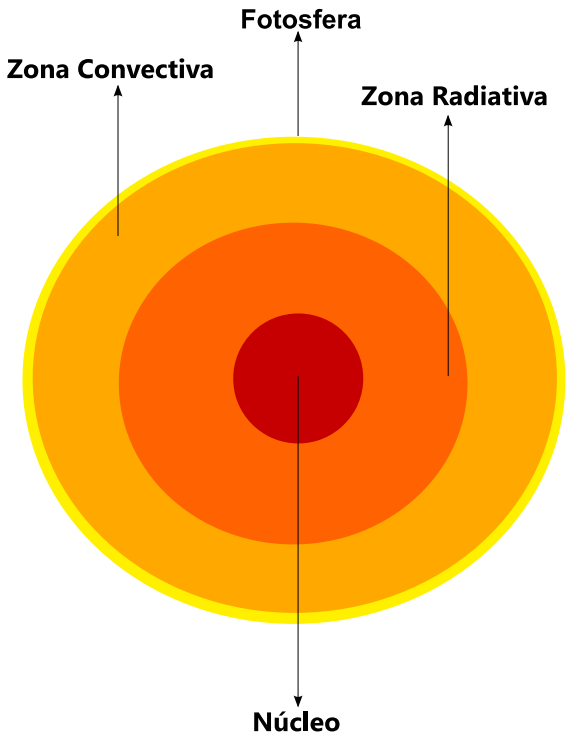


Figura 3 – Camadas internas do Sol(Fonte: Autor)

(PRIEST, 1997). Propriedades observáveis, tais como massa, densidade e volume permitem modelar a estrutura interior do Sol. De acordo com tal modelo, a estrutura interna do Sol é subdividida em camadas (conforme figura 3) e, em suas regiões mais centrais, elevadas temperatura, pressão e densidade favorecem a ocorrência de reações termonucleares (SAHA, 2008).

A parte mais interna do Sol, denominada de **Núcleo**, possui um raio de aproximadamente $0,25R_{\odot}$ e volume próximo de $1,6\%$ $R_{\odot}$. Devido a sua elevada densidade de matéria, o Núcleo do Sol concentra cerca de 50% da massa total da estrela (SAHA, 2008). A uma temperatura de aproximadamente $1,5 \times 10^7$ K, o Núcleo Solar gera energia a partir da fusão do Hidrogênio em Hélio, a uma razão de 5 milhões de toneladas de Hidrogênio a cada segundo (PRIEST, 1997). Tal processo é resultado da Teoria da Relatividade Especial de Albert Einstein para matéria e energia ($E = m \cdot c^2$) , o qual é responsável por liberar uma grande quantidade de energia, conforme mostrado na tabela 2 (SAHA, 2008).

Os termos e^+, ν, γ e D^2, mostrados na tabela 2, denotam, respectivamente, um pósitron, um neutrino, radiação γ e um Deutério. Essas reações são responsáveis por cerca de $98,5\%$ do total de energia produzida pelo Sol, e são denominadas de cadeia próton -

Reação	Energia Liberada
$H^1 + H^1 \rightarrow D^2 + e^+ + \nu$	1,44 MeV
$D^2 + H^1 \rightarrow He^3 + \gamma$	5,49 MeV
$He^3 + He^3 \rightarrow He^4 + H^1 + H^1$	12,85 MeV

Tabela 2 – Reação em cadeia próton - próton

Reação	Energia Liberada
$C^{12} + H^1 \rightarrow N^{13} + \gamma$	2,0 MeV
$N^{13} \rightarrow C^{13} + e^+ + \nu$	0,5 MeV
$C^{13} + H^1 \rightarrow N^{14} + \gamma$	8,2 MeV
$N^{14} + H^1 \rightarrow O^{15} + \gamma$	7,5 MeV
$O^{15} \rightarrow N^{15} + e^+ + \nu$	0,7 MeV
$N^{15} + H^1 \rightarrow C^{12} + He$	5,2 MeV

Tabela 3 – Reação em cadeia Carbono - Nitrogênio

próton. O percentual de energia remanescente é gerado através de outra reação em cadeia conhecida como cadeia Carbono - Nitrogênio, onde íons de Hidrogênio são convertidos em íons de Hélio, através de reações que envolvem íons de Carbono e Nitrogênio, conforme mostrado na tabela 3 (SAHA, 2008).

A energia gerada no núcleo, quase toda composta de fótons de Raios-X e radiação γ (SAHA, 2008), flui radialmente para longe do centro do Sol, atravessando uma camada esférica cujo raio varia de $0,25R_\odot$ a $0,75R_\odot$, conhecida como **Zona Radiativa**. A sua elevada opacidade faz com que os fótons de energia sofram inúmeras deflexões, absorvições e reemissões, fazendo assim com que o trânsito de energia ocorra de forma lenta. O tempo que um fóton de energia leva para atravessar a Zona Radiativa é de aproximadamente 10 milhões de anos (PRIEST, 1997). Quanto a sua temperatura, ela varia de aproximadamente $15,5 \times 10^6$ K, nas vizinhanças do Núcleo, a $2,5 \times 10^6$ K em sua fronteira externa (SAHA, 2008).

O elevado gradiente térmico radial do Sol provoca intensas instabilidades na região esférica de $0,75R_\odot$ a $1R_\odot$. Tais instabilidades causam fortes turbulências e atividades de convecção. A essa região, denomina-se de **Zona Convectiva** (PRIEST, 1997). A energia vinda na interface com a Zona Radiativa faz com que todo o plasma contido naquela região esférica acelere de forma súbita, até atingir a superfície visível do Sol, onde emite toda a sua energia. Então, o plasma se resfria, e afunda para os níveis inferiores da Zona de Convectiva, formando assim uma célula de convecção. A variação térmica nessa faixa vai de 2×10^6 K, na parte inferior, a, aproximadamente 6.000 K, na parte superior (SAHA, 2008).

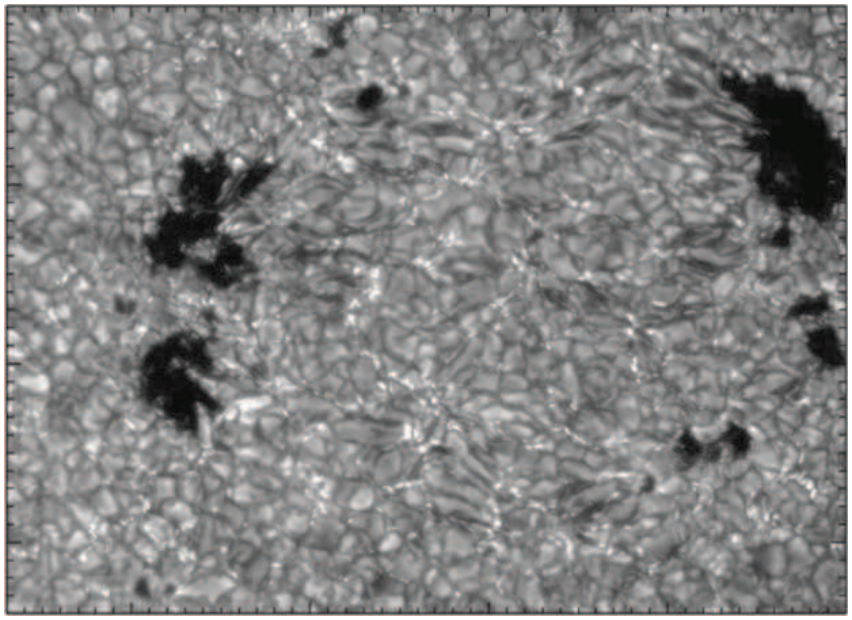


Figura 4 – Imagem da superfície do Sol tirada em 13 de Maio de 2005 pelo Telescópio Solar em La Palma (Adaptado de KARTUNNEN ET AL, 2017)

3.1.2 Atmosfera Solar

A atmosfera solar é dividida em três camadas: a **Fotosfera**, a **Cromosfera** e a **Coroa Solar**. A primeira camada possui uma espessura de aproximadamente 500.000 metros, uma densidade da ordem de 10^{23} partículas por metro cúbico, é dela que provem a maior parte da luminosidade do Sol (PRIEST, 1997), e é a região visualmente observável do Sol (LIOU, 2002). Ao longo de sua espessura, a temperatura varia de 8.000 K (na parte mais interna) a 4.500 K (na parte mais externa). A Fotosfera é marcada pela presença de granulações (vide figura 4) ao longo de toda a sua superfície, a qual está em constante estado de variação. No centro de cada granulo, existe um fluxo ascendente de plasma aquecido, o qual é rodeado por um fluxo descendente de plasma mais resfriado (KARTUNNEN ET AL, 2017)

Acima da Fotosfera tem-se a Cromosfera, uma camada da atmosfera solar cuja densidade é de aproximadamente 10^{17} partículas por metro cúbico (PRIEST, 1997). Nessa região, a temperatura passa a aumentar, atingindo valores superiores a 10.000 K (SAHA, 2008), (LIOU, 2002) e (KARTTUNEN ET AL, 2017), e além disso, os gases são altamente rarefeitos (SAHA, 2008). Tal região torna-se visível apenas durante os eclipses totais do Sol, quando a Lua cobre totalmente a Fotosfera. Por fim, acima da Cromosfera tem-se a **Coroa Solar**, uma vasta região cuja densidade é de aproximadamente $10^{15}m^{-3}$, para as regiões mais próximas ao Sol, estendendo-se a distâncias que podem ir além de 1 UA (PRIEST, 1997). Semelhantemente a Fotosfera, a Coroa Solar também é auto luminosa, podendo apenas ser vista durante os eclipses totais do Sol, na forma de um anel de luz (SAHA, 2008) e (KARTTUNEN ET AL, 2017).

3.2 Atividade Solar: Campo Magnético e ciclos solares

As propriedades do Campo Magnético Solar devem-se a ação conjunta de processos dinâmicos que ocorrem dentro da Zona Convectiva (SCHMITT, 1994). Conforme a teoria mais aceita, a **Teoria do Dínamo**, a força magnética solar é gerada a partir da energia cinética de um fluido eletricamente condutor, no interior do Sol, que induz correntes elétricas (PORTUGAL, 2018), as quais, pelas Equações de Maxwell, induzem um campo magnético que permeia o Sistema Solar (CHARBONNEAU, 2010). A sua dinâmica interna faz com que tal campo tenha um comportamento variável, passando por ciclos de mínimo e máximo durante um período de aproximadamente 11 anos. Nos máximos de atividade solar, observa-se um aumento na emissão de Radiação Ultravioleta Extrema e Raio-X, que por sua vez, aumenta a temperatura e densidade da alta atmosfera, gerando maiores arrastos no satélites de baixa órbita e diminuindo a sua vida útil. É nessa época que uma maior quantidade de erupções/explosões solares (também conhecido com *flares*) e ejeções da massa coronal ocorrem, o que interfere diretamente no clima espacial (HATHAWAY, 2015).

Uma das descrições relacionadas a dinâmica do Campo Magnético Solar foi proposta por *Horace W. Babcock*, segundo a qual, na fase inicial de um ciclo, quando o Sol está em atividade mínima, as linhas de força magnética se dispõem em dipolo (semelhante ao campo magnético terrestre) (KARTUNNEN ET AL, 2017), com a diferença que nas regões próximas ao equador solar, as linhas de campo encontram-se altamente distendidas devido a presença de correntes elétricas dispostas em um plano nas regiões de baixa latitude solar. Esse plano é denominado de Lâmina de Correntes Heliosféricas, e tem uma forma de disco, que divide a Heliosfera em dois hemisférios com polaridades opostas, conforme mostrado na figura 5 (PORTUGAL, 2018).

Sendo as camadas externas do Sol um meio eletricamente condutor, elas são incapazes de atravessarem as linhas de campo magnético, e com isso, tais linhas ficam "congeladas"ao plasma e transportadas durante o movimento de rotação do Sol (KARTTUNEN ET AL, 2017). Uma vez que as camadas mais externas do Sol não executam essa rotação como um corpo sólido, havendo assim cisalhamento entre as diferentes faixas latitudinais, na medida em que o ciclo solar vai evoluindo, as linhas de campo magnético orientadas meridionalmente passam a ter um perfil cada vez mais espiralado, até o ponto de se romperem para produzir um campo magnético toroidal, paralelo as faixas latitudinais (KARTUNNEN ET AL, 2017 e HATHAWAY, 2015).

Conforme o modelo de Babcock, as linhas de campo magnéticas toroidais tornam-se mais intensas nas latitudes próximas a 30º, onde as forças de cisalhamento são mais

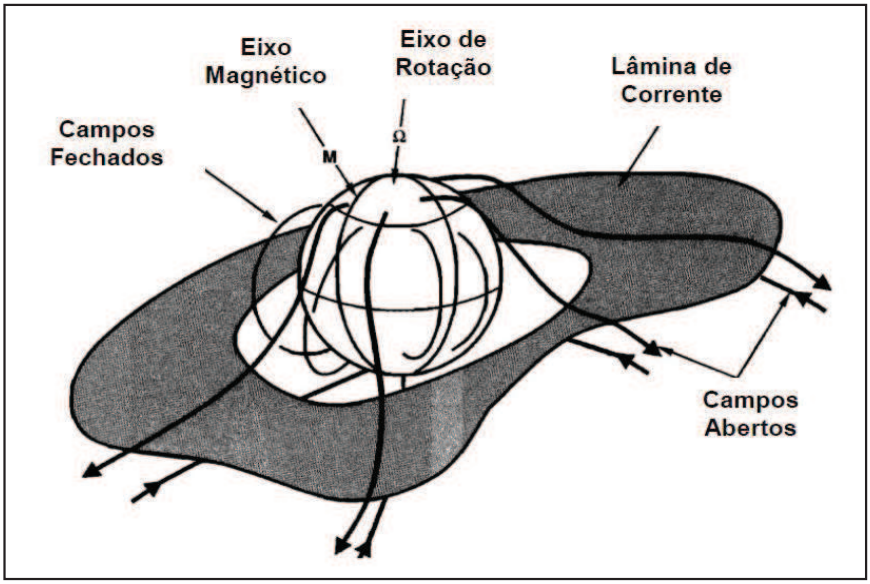


Figura 5 – Diagrama esquemático do Campo Magnético Solar durante o Mínimo Solar (PORTUGAL, 2018)

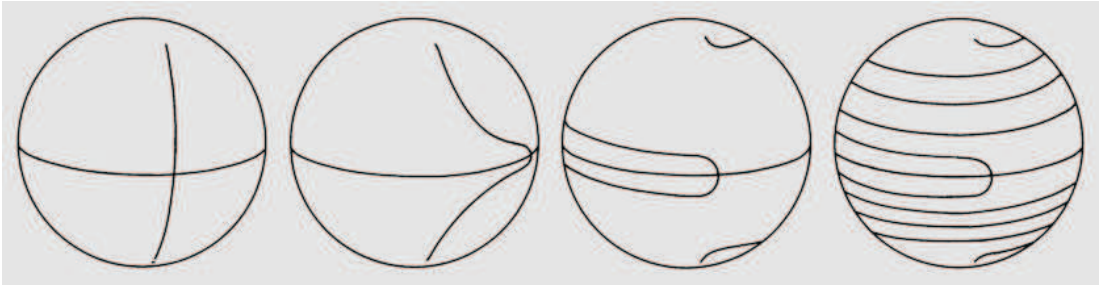


Figura 6 – Evolução do Campo Magnético Solar (KARTUNNEN ET AL, 2017)

fortes. Quando as forças magnéticas toroidais tornam-se suficientemente intensas, ela faz com que o plasma magnetizado flutue sobre o Sol, e com isso, linhas de campo magnético em forma de arco passam a surgir sobre a superfície solar, se manifestando visualmente na forma de **Manchas Solares**. Quando se tem um grande número desses arcos magnéticos, eles inevitavelmente passam a ter contato com as linhas de campo magnético em dipolo, ainda presente nas latitudes polares. Isso faz com que ocorra processos de reconexão entre as linhas de campo magnético, as quais tornam a ter o perfil dipolar, porém, com a polaridade inversa àquela observada antes (**Lei da Polaridade de Hale**) (HATHAWAY, 2015 e KARTUNNEN ET AL, 2017).

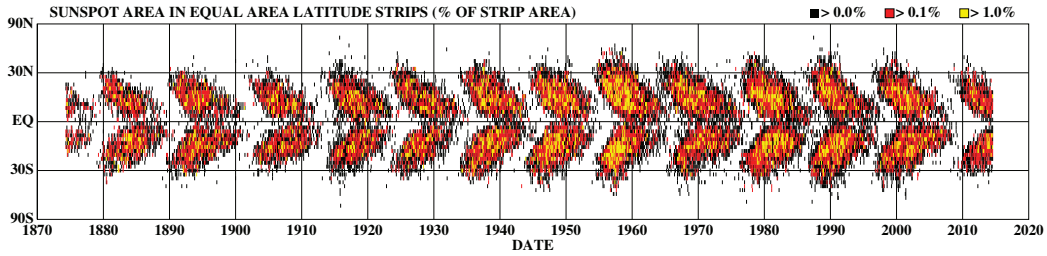


Figura 7 – Distribuição espaçotemporal das Manchas Solares sobre a superfície do Sol (HATHAWAY, 2015)

3.2.1 Índices de Atividade Solar

3.2.1.1 Manchas Solares: Características e Número de Manchas Solares

Tendo a sua existência conhecida desde o Século IV a.C, as manchas solares consistem de áreas mais escurecidas dispostas ao longo do disco visível solar. Essas áreas podem atingir um diâmetro de até 20 Mm, possuindo uma parte mais escura localizada no centro, denominada de **Umbra**, e uma parte periférica menos escura, conhecida como **Penumbra** (PRIEST, 1997). A temperatura média sobre uma mancha solar é aproximadamente 1.500 K menor do que a área de seu entorno, o que explica a sua cor escura. O seu diâmetro médio é de aproximadamente 10.000 km, e o seu tempo de vida varia entre poucos dias e vários meses. Grandes manchas solares têm maiores probabilidades de terem tempo de vida longo (KARTUNNEN ET AL, 2017). Normalmente, as manchas solares aparecem em pares, tendo as suas polaridades magnéticas antiparalelas e unidas por linhas de campo magnético em arco, as quais se desenvolvem ao longo da atmosfera solar (SAHA, 2008), e inibem o fluxo convectivo vindo dos níveis mais internos, o que explica a temperatura mais baixa (PRIEST, 1997). Esses arcos magnéticos possuem elevado abrilhantamento nos imageamentos do Sol em Raio-X (SAHA, 2008).

O Número de Manchas Solares é, indubitavelmente, a principal manifestação do ciclo de atividade magnética do Sol, e uma vez que tal quantidade está diretamente ligada com o Campo Magnético do Sol, é correto afirmar que o Número de Manchas Solares varia de forma cíclica durante o período de 11 anos. *Diagramas Borboletas* (figura 7) mostram que as manchas solares aparecem de forma simétrica e restrita a zona latitudinal entre os paralelos $\pm 30^{o}$, durante a evolução de um ciclo, as manchas solares tendem a surgirem mais próximas ao equador solar, tendo o seu pico de cobertura nas latitudes $\pm 15^{o}$, e a variação espaçotemporal da cobertura de Manchas Solares ocorrem de forma sincronizadas nos dois hemisférios do Sol (CHARBONNEAU, 2020).

O Número Internacional de Manchas Solares foi introduzido em 1848 por Rudolf Wolf e consiste no banco de dados contínuo relacionado com o nível de atividade solar mais extenso. No princípio, tal banco de era fornecido e mantido pelo Observatório Federal da Suíça, localizado na cidade de Zurique. Atualmente, esse índice pode ser obtido a partir do **Sunspot Index Data Center**, localizado em Bruxelas, Bélgica, onde atualizações mensais estão disponíveis via internet (HATHAWAY, 2002). Uma vez que Rudolf Wolf percebeu que é mais fácil identificar as Manchas Solares por grupos ao invés de identifica-las individualmente, ele desenvolveu a equação onde o Número de Manchas Solares (R_z) é dado por (HATHAWAY, 2015):

$$R_z = k(10g + n) \tag{3.1}$$

Onde k denota um fator de correção para o observador, g o número de manchas identificadas e n quantidade manchas individuais. Paralelamente ao Número Internacional de Manchas Solares, existe o Número de Manchas Solares de Boulder, produzido pela Força Aérea dos Estados Unidos (USAF) e pela NOAA - Administração Nacional de Atmosfera e Oceanos a partir do mapeamento de Manchas Solares feita pela Rede de Observações Óticas Solares (*Solar Optical Observing Network* ou SOON), desde o ano de 1977. Tal medida pode ser obtida atribuindo $k = 1$ na equação 3.1, fazendo com que esse índice seja 55% mais extenso que o Número Internacional de Manchas Solares, onde $k = 0,65$ (HATHAWAY, 2015).

A média anual de Manchas Solares em um típico Mínimo Solar é de aproximadamente 6 manchas. Durante tal período, é comum a presença de séries de dias ou semanas onde nenhuma Mancha Solar pode ser observada. Porém, casos onde de média mensal igual a zero são muito raros de acontecerem, e houve apenas um ano (1810) onde a média anual foi igual a zero, para uma precisão de dois dígitos. Em contrapartida, durante os anos da Máxima Atividade Solar, é muito raro haver um dia onde Manchas Solares não são observadas. Nessa fase, elas se apresentam em centenas (EDDY, 1976).

Uma outra maneira em quantificar as Manchas Solares é através do número de Grupos de Manchas Solares. Esse índice conta somente os grupos de manchas, fazendo a média entre os dados advindos de múltiplos observadores, e normalizando tal quantidade ao Número Internacional de Manchas Solares a partir de (HATHAWAY, 2015):

$$R_G = \frac{12,08}{N} \sum_{i=1}^{N} k_i G_i \tag{3.2}$$

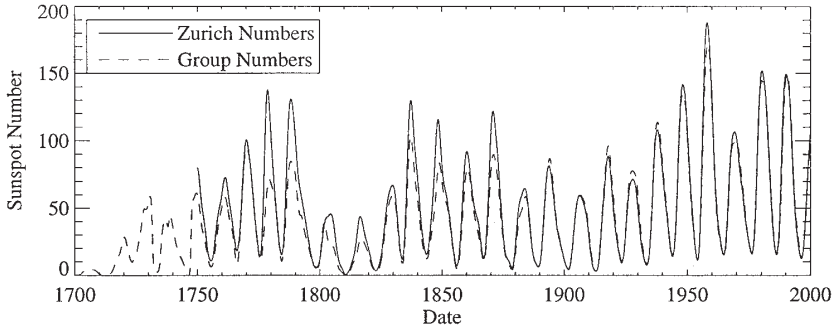


Figura 8 – Número suavizado de Manchas solares desde 1700 a 2000: Número Internacional de Manchas (linha contínua) e Número de Grupo de Manchas Solares (Linha tracejada)(Adaptado de HATHAWAY et al, 2002)

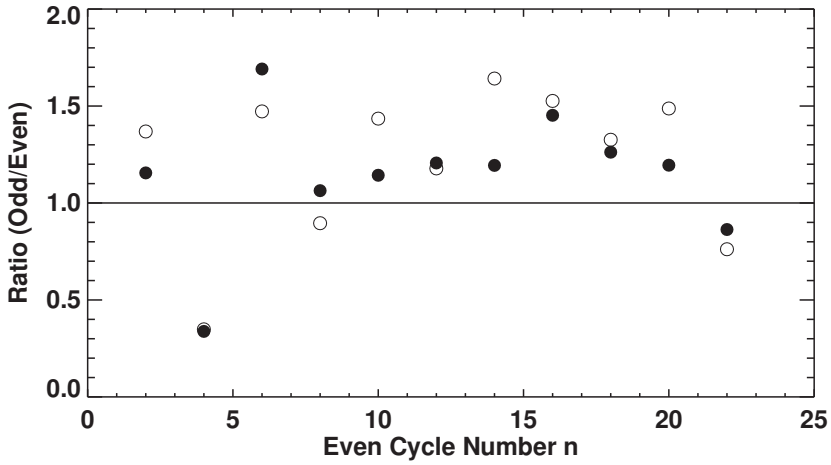


Figura 9 – Regra de Gnevyshev - Ohl. Os pontos pretos denotam a razão entre o Número de Manchas Solares entre os ciclos ímpares e pares. Os pontos brancos, a razão de amplitude entre os ciclos ímpares e pares

Onde G_i denota a quantidade de grupos de Manchas Solares registrado pelo observado i, k_i o fator de correção para o observador i, N o número de observadores usados para obter o valor diário e 12,08 o fator de normalização que torna a média R_G idêntica a média R_z para o período de 1874 à 1976, quando o Observatório Real de Greenwich realizou a observações de manchas solares tomando como base a equação 3.2 (HOYT; SCHATTEN, 1997).

Registros relacionados aos Número de Manchas Solares têm trazido grandes recursos estatísticos capazes de auxiliar na compreensão da natureza do ciclo solar e na elaborações de modelos teóricos fieis. A figura 8 mostra as variações nos índices R_z e R_G entre os anos de 1700 e 2000. Tais índices concordam entre si após o ano de 1870, aproximadamente. Além disso, é possível perceber que os ciclos de maiores amplitudes atingem o seu máximo em menos tempo do que os ciclos com amplitudes menores. Tal fenômeno é conhecido como **Efeito Waldmeier** (HATHAWAY et al, 2002).

Um outro fenômeno relacionado a variação do Número de Manchas Solares é **Efeito Par - Impar**, também conhecido como Regra de Gnevyshev - Ohl. Segundo

essa regra, ao ordenar os ciclos solares consecutivos em pares, onde os ciclos ímpares precedem os ciclos pares, percebe-se que a soma de manchas solares nos ciclos ímpares serão maiores do que aquelas observadas nos de numeração par. Com exceção dos pares 4/5, 8/9 e 22/23, é possível perceber uma razão maior do que 1 entre o Número de Manchas Solares/Amplitude dos ciclos solares ímpares e pares, conforme mostrado na figura 9 (HATHAWAY, 2015).

3.2.1.2 Erupções Solares e Ejeções de Massa Coronal

Uma das primeiras observações de erupções solares ocorreu em 1 de setembro de 1859 por Richard Carrington ao observar o Sol a partir da luz branca (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Observando a imagem do Sol projetada em uma tela, Carrington percebeu um abrilhantamento que durou aproximadamente 5 minutos (HATHAWAY, 2015), e 17 horas após, percebeu uma intensa tempestade magnética na Terra (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Conforme Priest (1997), todo o processo de uma Erupção Solar se inicia quando uma região ativa do Sol se eleva, em função de uma condição de instabilidade, fazendo com que as linhas de campo magnético em arcos se alonguem a ponto de se romperem e reconectarem, provocando assim uma liberação de grandes quantidades de energia (PRIEST, 1997). Tais eventos consistem em uma das formas mais violentas nas quais a atividade solar se manifesta, podendo ser identificadas como um abrilhantamento que pode durar de poucos segundos a pouco menos de um hora. Além disso, as elas podem ser observadas em todos as frequências do Espectro Eletromagnético, e várias erupções podem ser observadas nas frequências de rádio (KARTTUNEN ET AL, 2017).

A partir de observações da Coroa Solar durante a década de 1970, o surgimento frequente de estruturas semelhantes a grandes bolhas formadas por matéria coronal e que se propagavam a grandes velocidades pode ser observado. Tal fenômeno é atualmente conhecido como Ejeção de Massa Coronal (BOTHMER; ZHUKOV, 2007), podem ocorrer tanto em conjunto com uma Erupção Solar, quanto de forma isolada, e atualmente, têm a sua ocorrência monitorada pela sonda SoHO (HATHAWAY, 2015), a qual já registrou mais de 10.000 casos (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Uma Ejeção de Massa Coronal transporta entre 5×10^{12} e 5×10^{13} quilogramas de matéria solar no meio interplanetário. Até uma distância de 2 $R_{\odot}$, as partículas normalmente viajam a uma velocidade constante (BOTHMER; ZHUKOV, 2007).

A velocidade média das partículas expelidas durante uma Ejeção de Massa Coronal é de aproximadamente 400 km/s, havendo casos onde observa-se velocidades mais baixas e casos onde a velocidade de fluxo exceda 3.000 km/s, contudo. Quanto a Energia Cinética, uma Ejeção de Massa Coronal atinge valores entre 10^{23} e 10^{24} Joules, o que equivale

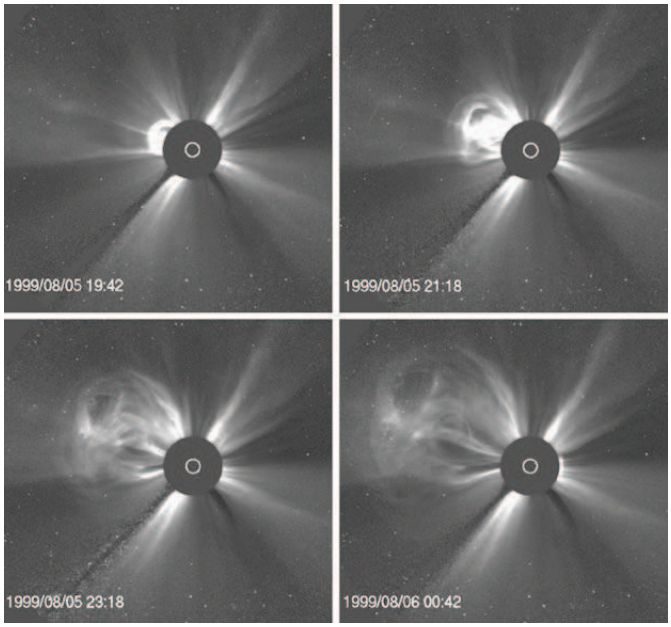


Figura 10 – Ejeção de Massa Coronal de grande magnitude observada pela sonda espacial SoHO em 5 de Agosto de 1999 (KARTTUNEN et al, 2017).

a energia liberada durante uma Erupção Solar de grande magnitude. Nos mínimos de atividade solar, as Ejeções de Massa Coronal ocorrem próximas ao equador solar, enquanto que durante os máximos solares, em quase toda a superfície do Sol (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Tal fenômeno consiste no maior e mais energético evento relacionado com liberação de plasma e campo magnético solar, sendo também a principal causa de tempestades geomagnéticas, quando direcionadas para a Terra (CHANDRA; BHAT, 2018).

A figura 10 mostra uma grande Ejeção de Massa Coronal registrada pela sonda espacial SoHO - Solar Heliospheric Observatory em 5 de Agosto de 1999. A velocidade inicial das partículas foi de 700 km/s, contudo, durante o seu deslocamento dentro de uma distância próxima a dez $R_{\odot}$, tais partículas foram aceleradas a uma velocidade próxima de 1000 km/s, conforme as medições feitas dentro de um campo de visão de 6 a 30 raios solares (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Na figura, a superfície visível do Sol encontra-se coberta por um disco escuro. As dimensões e posição do Sol pode ser identificada pelo círculo branco (KARTTUNEN et al, 2017).

3.2.1.3 Vento Solar

Denomina-se de vento solar um fluxo de plasma o qual atravessa todo o meio interplanetário e que carrega consigo o campo magnético solar. Ele é resultado de um gradiente de pressão entre a Coroa Solar e o meio interestelar, o qual faz com que o plasma do Sol seja expelido para longe do centro do Sistema Solar, vencendo assim a ação do campo gravitacional do Sol (HUNDHAUSEN, 1997). O vento solar é responsável por permear toda uma cavidade, contida na nuvem interestelar, preenchendo-a com material

Densidade de Prótons	$6,6cm^{-3}$
Densidade de Elétrons	$7,1cm^{-3}$
Densidade de He^{2+}	$0,25cm^{-3}$
Velocidade radial de fluxo	450 km/s
Temperatura dos Prótons	$1,2 \times 10^5 K$
Temperatura dos Elétrons	$1,4 \times 10^5 K$
Campo Magnéticos Induzido	$7 \times 10^{-9} T$

Tabela 4 – Propriedades do vento solar

solar e campo magnético. Tal cavidade é denominada de Heliosfera e todo gás presente no meio que a envolve é mantido fora dela. Lançadas em 1977, as sondas espaciais *Voyager I* e *Voyager II* navegaram através da Heliosfera, em direção a *Heliopausa*. Acredita-se que os confins da Heliosfera é marcado por uma frente de choque, onde a velocidade de fluxo do vento solar sofre uma súbita desaceleração até entrar em estado de equilíbrio com os gases do meio interestelar. Em Dezembro de 2004, um par de magnetômetros embarcados na sonda *Voyager I* detectou um aumento na intensidade do campo magnético do meio interplanetário de aproximadamente $0,05nT$ para $0,15nT$, mantendo-se nesse patamar. Estima-se que essa variação em degrau deva-se a uma desaceleração do vento solar, ao interagir com a onda de choque (CROSBY, 2007).

O vento solar é constituído majoritariamente por prótons e elétrons, havendo também a presença de núcleos de átomos de Hélio. A uma distância de 1 UA, a concentração de partículas está entre 5 e 10 cm^{-3}. Nas regiões próximas aos polos do Sol, a velocidade de fluxo do vento solar é de aproximadamente 800 km/s, enquanto que nas regiões próximas ao equador, é de apenas 300 km/s. Na órbita da Terra, a velocidade média do fluxo de partículas é de 500 km/s (KARTTUNEN et al, 2017). Além disso, fenômenos transientes, como as Ejeções de Massa Coronal, são capazes de produzir rajadas onde a velocidade atinje alguns milhares de km/s (RICHARDSON e BURLAGA, 2013). A tabela 4 mostra algumas outras características do vendo solar próximo à órbita da terrestre (HUNDHAUSEN, 1997):

Observações mostram que o Vento Solar possui dois padrões de fluxo: o fluxo lento e o fluxo rápido, tendo um período de recorrência de aproximadamente 27 dias. Medições do vento solar feitas em conjunto com imageamento em Raio-X mostram que o fluxo rápido de vento solar originam-se dos chamados **Buracos Coronais**, os quais se apresentam como regiões escuras nos imageamentos em Raio-X e Ultravioleta Extremo. Essas áreas mostram-se mais escuras porque as linhas de campo magnético sobre elas possuem apenas um único ponto de intersecção com a fotosfera, diferente de regiões ativas, onde as linhas em arco atravessam a fotosfera em dois pontos, o que torna o plasma mais quente e provoca abrilhantamentos em imageamentos com Raio-X e Ultravioleta Extremo. Rajadas de vento solar na órbita da Terra normalmente ocorrem após 3 dias de detecção de um buraco coronal geoefetivo (BOTHMER; ZHUKOV, 2007).

Devido ao movimento de rotação do Sol de aproximadamente 27 dias (tomando a Terra como referencial), o campo magnético solar trazido pelo vento solar assume um padrão estrutural em espiral, o qual é conhecido como **Espiral de Parker** (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Esse campo magnético encontra-se em um plano aproximadamente paralelo ao plano da eclíptica, porém, para um referencial situado na órbita da Terra, as linhas de campo formam um ângulo de 45º com a reta que une o Sol e esse ponto de referência (HUNDHAUSEN, 1997). De acordo com a **Equação de Parker**, a velocidade das partículas tendem a uma assíntota horizontal, a densidade diminui com R^{-2} e o campo magnético $\overrightarrow{B}$ decresce com R^{-1} (RICHARDSON e BURLAGA, 2013).

De acordo com Hundhausen (1995), o vento solar é altamente influenciado pelo ciclo de atividade solar, principalmente devido a mudanças físicas no campo magnético solar. Tais variações são transmitidas aos planetas, cometas, poeira cósmica e raios cósmicos contidos na Heliosfera. Durante os mínimos de atividade solar, o vento solar possui um elevado gradiente latitudinal, onde a intensidade do vento decresce com o aumento da latitude do Sol. Nas faixas latitudinais próximas ao equador, a velocidade média do vento solar é 350 km/s, com uma densidade de $7cm^{-3}$. Para as latitudes mais elevadas, a velocidade e densidade do vento solar equivalem, respectivamente, 700 km/s e $3cm^{-3}$. Durante os máximos solares o vento solar possui velocidade mais baixa e densidade mais elevada (RICHARDSON e BURLAGA, 2013).

3.2.1.4 Radiação Solar

O **Espectro Solar**, definido como a distribuição de radiação eletromagnética, em função do comprimento de onda, emitida pelo Sol e que incide sobre o topo da alta atmosfera terrestre, abrange frequências do espectro eletromagnético que variam desde a radiação gama até as ondas de rádio (LIOU, 2002). A **Constante Solar**, por sua vez, é definido como a potência da radiação solar (energia por unidade de tempo) que cruza uma unidade de área normal à direção de propagação da onda, em uma distância equivalente a distância média entre a Terra e o Sol (HATHAWAY, 2015) e (LIOU, 2002).

Considerando que o Sol emite energia a uma razão de $6,2 \times 10^7\ W/m^2$ e aplicando o princípio da conservação da energia, tem-se que (LIOU, 2002):

$$F_\odot 4\pi r_\odot^2 = S4\pi r_\oplus^2 \tag{3.3}$$

Onde $F_\odot = 6,2 \times 10^7\ W/m^2$, $r_\odot$ denota o raio do Sol, $r_\oplus$ o raio médio da

órbita terrestre e S a constante solar, cujo valor mais aceito atualmente é de 1367 W/m^2 (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Fazendo $R_\oplus$ a distância radial entre o centro da Terra e o topo da alta atmosfera, a energia total recebida será de $S\pi R_\oplus$. Por unidade de área será (LIOU, 2002):

$$\frac{S\pi R_\oplus^2}{4\pi R_\oplus^2} = \frac{S}{4} \tag{3.4}$$

A partir da Lei de Stefan-Boltzmann e aproximando o Sol a um corpo negro ideal, tem-se que a quarta potência da temperatura superficial do Sol será dada por (LIOU, 2002):

$$T_\odot^4 = \left(\frac{r_\oplus}{r_\odot}\right)^2 \left(\frac{S}{\sigma}\right) \tag{3.5}$$

Onde o termo σ denota a constante de Stefan-Boltzmann. Inserindo os valores numéricos, obtém-se um valor de aproximadamente 5.800 K para a superfície do Sol (LIOU, 2002). Contudo, de acordo com Bothmer e Zhukov (2007), o espectro solar real difere do espectro de radiação eletromagnética de um corpo negro ideal, uma vez que a atmosfera solar contribuem para maiores emissões de ondas de Raio X e Ultravioleta Extremo. Além disso, fenômenos transientes como erupções solares e ejeções de massa coronal ocasionam aumentos repentinos nas emissões de ondas de rádio, Raios Gama, Raios X e Ultravioleta Extremo, os quais se sobrepõem o espectro eletromagnético contínuo do Sol (BOTHMER; ZHUKOV, 2007).

As primeiras observações do Sol feitas por satélites, em 1978, confirmaram de forma qualitativa que a Constante Solar assume valores maiores durante os Máximos Solares quando comparado aos Mínimos (LABITZKE; VAN LOON, 2007). De maneira geral, a variação da Constante Solar ao longo de um ciclo é de apenas $0,1\%$, aproximadamente, o que é um valor irrisório para provocar alterações na baixa atmosfera (BOTHMER; ZHUKOV, 2007). Todavia, para alguns comprimentos de onda específicos, tais como o Ultravioleta e o Ultravioleta Extremo, observam-se maiores variações ao longo de um ciclo. Dentro desses espectros, observa-se uma variação entre 6% e 8%, o que afeta diretamente a produção de O_3 e o aquecimento da atmosfera intermediária (LABITZKE; VAN LOON, 2007). A figura 11 mostra medições diárias da Constante Solar tomada de diferentes instrumentos. Ponto a ser destacado nessas medições é a queda no valor da Constante

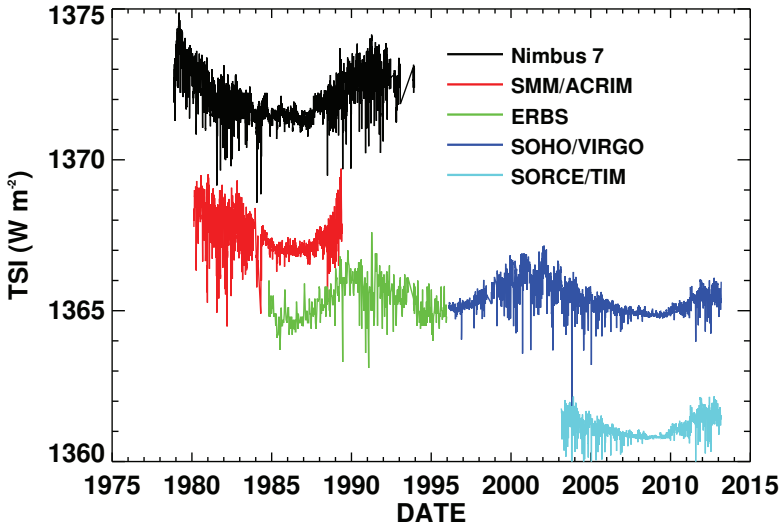


Figura 11 – Medições diárias da constante solar a partir de distintos instrumentos embarcados em satélites e sondas espaciais (HATHAWAY, 2015)

Solar, notável em todas as medições, devido a formação e passagem de um grande grupo de manchas solares, assim como um aumento e diminuição, de forma geral, nesse valor no decorrer de um ciclo solar (HATHAWAY, 2015).

3.2.1.5 Fluxo Solar Rádio F10.7

Denomina-se de **Fluxo Solar F10.7** emissões vindas do Sol dentro do espectro das ondas de rádio, mais especificamente no comprimento de onda $\lambda = 10,7$ centímetros, ou 2.800 MHz de frequência. Diferentemente do Número de Manchas Solares, o Fluxo Solar F10.7 consiste em um meio mais objetivo para se medir o nível de atividade solar, podendo ser realizado sob qualquer condição atmosférica (HATHAWAY, 2015). O F10.7 é medido diariamente pelo Conselho Nacional de Pesquisas do Canadá e é amplamente utilizado tanto como um índice de atividade solar, quanto uma medida indireta de variáveis que não podem ser medidas diretamente (TAPPING; CHARROIS, 1994).

Coletam-se várias medidas do fluxo solar F10.7 diariamente e cuidados são sempre tomados para evitar que os valores obtidos possam ser camuflados por fenômenos solares transientes, tais como as erupções. Entre os anos de 1946 e 1990, as medições eram feitas a partir da cidade de Ottawa, contudo, no ano de 1990, foi instalado um novo centro de monitoramento na cidade de Penticton, onde tais dados são atualmente monitorados (HATHAWAY, 2015), sendo geralmente colhidos nas horas 17, 20 e 23 UTC (TAPPING; CHARROIS, 1994). A relação entre o F10.7 e a Média Suavizada de Manchas Solares (R_i) foi proposta por Holland e Vaughn (1984) *apud* Hathaway (2015), a qual é expressa pela

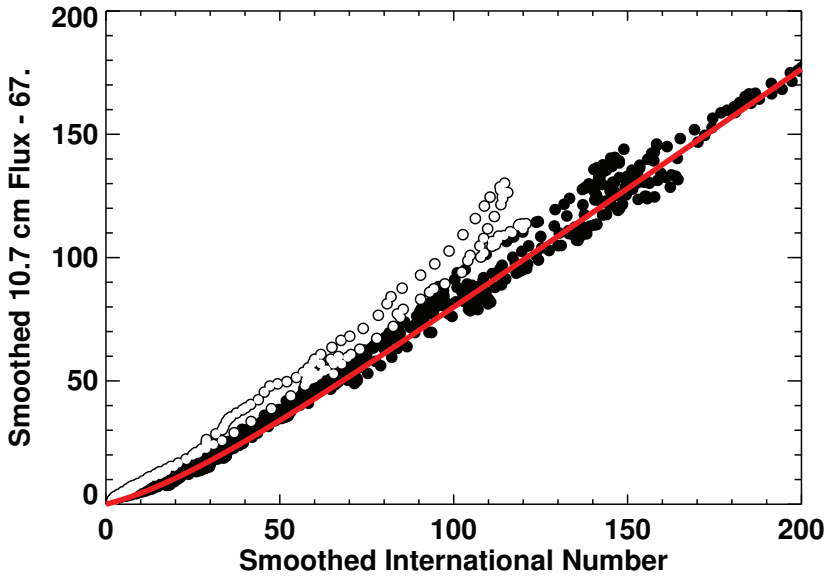


Figura 12 – Relação entre o fluxo solar F10.7 e o Número Internacional de Manchas Solares. Dados relativos a períodos anteriores ao ciclo solar 23 estão representados por alvéolos pretos, enquanto que aqueles obtidos após 1997, por alvéolos brancos. A linha vermelha é a relação proposta na equação 3.6. (HATHAWAY, 2015)

seguinte equação:

$$F_{10.7} = 67 + 0,97R_i + 17,6(e^{-0,035R_i} - 1) \tag{3.6}$$

Para valores menores que 30 Manchas Solares, as duas variáveis exibem uma relação não linear entre elas, porém acima disso, tais valores apresentam elevados índices de correlação ($r = 0,995$ e $r^2 = 0,990$). O gráfico mostrado na figura 12 expõe a relação entre as duas variáveis, onde a reta vermelha aponta para um elevado coeficiente de correlação, para $R_i > 30$ (HATHAWAY, 2015).

3.3 Raios Cósmicos

Conforme Karttunen et al. (2017), denomina-se de RC - Raios Cósmicos o fluxo de partículas que transitam através do espaço e que são responsáveis pelo aquecimento e ionização dos gases interestelares. O planeta Terra está sendo constantemente bombardeado por ondas e partículas advindas do meio espacial, cuja energia abrange um amplo espectro (VICHARE ET AL. 2018). Muitos aspectos estruturais da *Via Láctea* passaram a ser melhor entendidos após observações e estudos de tais partículas, complementando assim as sondagens espaciais feitas com o uso de ondas eletromagnéticas (DIEHL et al, 2001).

Connell (2001) afirma que a concentração de isótopos contidos no feixe de Raios Cósmicos é capaz de fornecer dados relativos tanto a evolução química da galáxia quanto às fontes das partículas contidas nessa feixe. Contudo, uma vez que são constituídos de partículas eletricamente carregadas, o seu vetor velocidade está sendo constantemente modificado pela ação de campos magnéticos presentes no meio interestelar, e com isso, não é possível inferir informações relativas à sua origem somente pela sua direção de propagação (KARTTUNEN et al. 2017; CROSBY, 2007).

De acordo com Diehl et al (2001) e Ramaty, Lingenfelter e Kozlovsky (2001), a natureza primária do processo evolutivo do Berílio sugere veementemente que tal elemento químico tenha sido originado a partir das explosões das **Super Novas**, e portanto, ele juntamente com o Lítio Li e o Boro B vieram a Terra a partir dos Raios Cósmicos. Contudo, Ramaty, Lingenfelter e Kozlovsky (2001) afirmam que o Berílio por si só pode servir como uma espécie de "caixa preta"contendo dados relacionados a origem e energização das partículas que se tornaram em Raios Cósmicos. Estudos realizados por Soutoul et al (1978) *apud* Mewalt (2001), conseguiram identificar a presença de núcleos atômicos de elementos pertencentes ao grupo Fe ($^{59}Ni, ^{57}Co, ^{56}Ni$) cujo decaimento ocorre pela captura de elétrons livres, e que são decorrentes de processos explosivos de nucleossíntese.

Quanto a sua natureza, os raios cósmicos são ordenados em duas classes: primários e secundários. A primeira classe consiste de partículas produzidas e aceleradas diretamente na fonte, enquanto que a segunda classe consiste de partículas resultantes das interações das partículas dos Raios Cósmicos Primários com outras partículas tanto do meio interestelar, quanto da atmosfera terrestre (MEWALT et al, 2001; CROSBY, 2007). Os Raios Cósmicos Primários são constituídos por 99% de prótons e partículas alfa e 1% de núcleos mais pesados (VICHARE EL AL. 2018), com poucas partículas radioativas capazes de sobreviver por longos períodos de tempo, tais como Th, U, Np e o Cm, havendo também três tipos de isótopos de Ferro, cujo decaimento ocorre pela captura de elétrons livres (MEWALT et al, 2001). Dentre as partículas encontrada nos Raios Cósmicos Secundários, pode-se encontrar isótopos que não são comuns dentro do sistema solar tais como isótopo de Boro, de Lítio, de Vanádio e de Escândio, os quais são resultados da fragmentação de elementos mais pesados no meio interestelar (WIEDENBECK et al, 2001).

Em relação a sua origem, os Raios Cósmicos são classificados em: Raios Cósmicos Galácticos (RCG), Raios Cósmicos Solares (RCS) e Raios Cósmicos Anômalos (RCA) (DORMAN, 2004; CROSBY, 2007). Os RCG consistem das partículas mais energéticas encontradas no Sistema Solar, são constituídos majoritariamente por núcleos de átomos de Hidrogênio, entre 7% e 10% de partículas α e cerca de 1% de elementos mais pesados. Processos violentos de energização fazem com que os elétrons sejam extraídos dos átomos que o compõe, resultando assim na presença de feixes de elétrons, os quais perfazem

1% da constituição dos RCG (CROSBY, 2007). Os Raios Cósmicos Galácticos possuem energia máxima entre 10^{15} e 10^{16} eV e são produzidos majoritariamente por explosões e remanescentes de Super Novas, pela magnetosfera de pulsares e estrelas binárias, por frentes de choque do meio interestelar, entre outros (DORMAN, 2004).

Os RCA - Raios Cósmicos Anômalos representam uma amostra do conteúdo do meio interestelar muito próximo a Heliosfera. Uma vez que tais partículas não tenham passados por processos violentos, elas apresentam baixa velocidade e energia. Eles são compostos majoritariamente por Hélio, Nitrogênio, Oxigênio, Neônio e outros elementos de alto potencial de ionização. O vento solar impede que partículas ionizadas da nuvem interestelar adentrem na Heliosfera, permitindo apenas a entrada de partículas eletricamente neutras. Contudo, na medida em que se aproximam do Sol, tais partículas tornam-se ionizadas e sujeitas ao campo magnético do vento solar. Porém, como as partículas dos RCA são menos ionizadas do que aquelas encontradas nos RCG, elas estão menos sujeitas a ação do campo geomagnético (CROSBY, 2007).

Além das categorias supracitadas, existem os Raios Cósmicos de origem extragaláctica e de origem magnetosférica. A primeira categoria consistem de partículas cuja energia se estende até 10^{21} eV, e que são geradas a partir das galáxias com grande emissão de ondas de rádio, quasares, e outros corpos do universo bastante energéticos. Tais partículas viajam através do meio intergaláctico, penetram na Via Láctea e, subsequentemente, na Heliosfera. Quanto a segunda categoria, ela é constituída por partículas geradas na magnetosferas dos planetas magnéticos. Enquanto que para Júpiter e Saturno, a energia das partículas é da ordem de 10^7 eV, para o planeta Terra, é de aproximadamente 3×10^4 eV (DORMAN, 2004; PORTUGAL, 2018).

Paralelo com a sua composição, outro parâmetro importante a ser observado nos Raios Cósmicos é a seu espectro de energia, que, de acordo com Simpson (1983) *apud* Portugal (2018), é representado pela Lei de Potência, dado matematicamente por: $\Phi(E) \propto E^{-\gamma}$, onde o termo γ denota o índice espectral para energias acimas de algumas unidades de GeV por Núcleo Atômico (PORTUGAL, 2018). A figura 13 mostra o espectro de energia das partículas de Raios Cósmicos. A hipótese mais aceita pela comunidade científica é que as partículas situadas abaixo do "tornozelo"da curva sejam de originadas a partir das explosões de Super Novas na Via Láctea (CROSBY, 2007). Conforme Portugal (2018): "A dominância dos RCG dá-se em energias acima de 10^3 MeV. Já na faixa das energias abaixo de algumas centenas de MeV, são os RCS os dominantes e entre algumas centenas de MeV e alguns GeV, predominam tantos os RGC quanto os RCS."

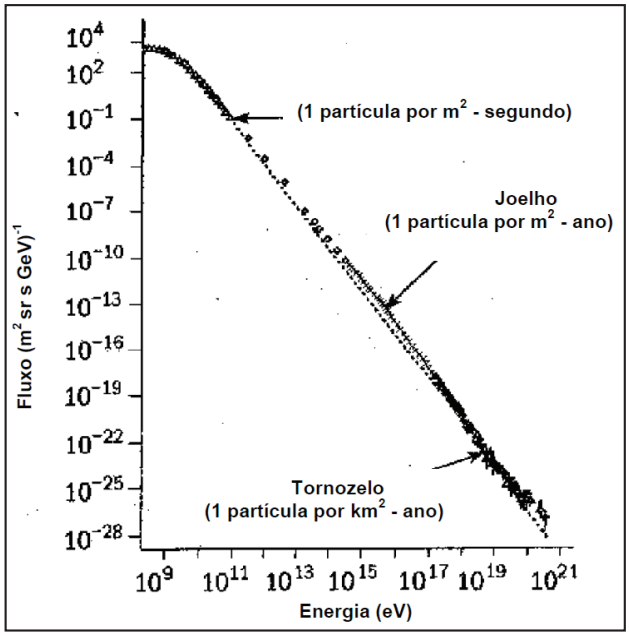


Figura 13 – Espectro de energia dos Raios Cósmicos (PORTUGAL, 2018)

3.3.1 Correlação entre o fluxo de Raios Cósmicos e os ciclos solares.

Uma vez que as partículas que compões os Raios Cósmicos estão eletricamente carregadas, elas estão sujeitas a ação de linhas de campo magnético que permeiam tanto o meio interestelar quanto o meio interplanetário. Desse modo, o campo magnético embutido no vento solar afeta diretamente o fluxo de partículas, dificultando o seu acesso às regiões mais internas do Sistema Solar (CROSBY, 2007). Para aquelas partículas conseguem penetrar nas regiões mais próximas ao Sol, o seu fluxo é modulado pela atividade solar, dentro uma zona que se estende em até 100 UA a partir do Sol (BEER, 2000). Na medida em que o nível de atividade solar aumenta, o número de partículas que penetram as regiões mais próximas ao Sol, e consequentemente a alta atmosfera terrestre, diminuem, de modo que as variáveis relacionadas com o nível de atividade solar (e.g Número de Manchas Solares e Fluxo Solar F10.7) possuem uma correlação negativa com o fluxo de Raios Cósmicos (CROSBY, 2007).

De acordo com a Lei da Polaridade de Hale, o Sol inverte a polaridade do seu campo magnético no decorrer de um ciclo solar (HATHAWAY, 2015), fazendo com que o campo magnético do Sol passe por ciclos de inversões, de períodos próximos a 22 anos (i.e dois ciclos solares). Uma vez que todo o fluxo de partículas através da Heliosfera deve-se à morfologia do campo magnético nela contudo e, sobretudo, à inclinação da Lâmina de Correntes Heliosféricas (vide figura 5), umas das manifestações desse ciclo de 22 anos encontra-se no seu efeito modulatório no fluxo de Raios Cósmicos (BELOV, 2000; FLORINSKI, FERREIRA, POGORELOV, 2011). Durante os mínimos solares com polaridade negativa, observa-se maiores densidades de fluxo de Raios Cósmicos do que para os mesmos períodos com polaridade positiva (BELOV, 2000). Contudo, para

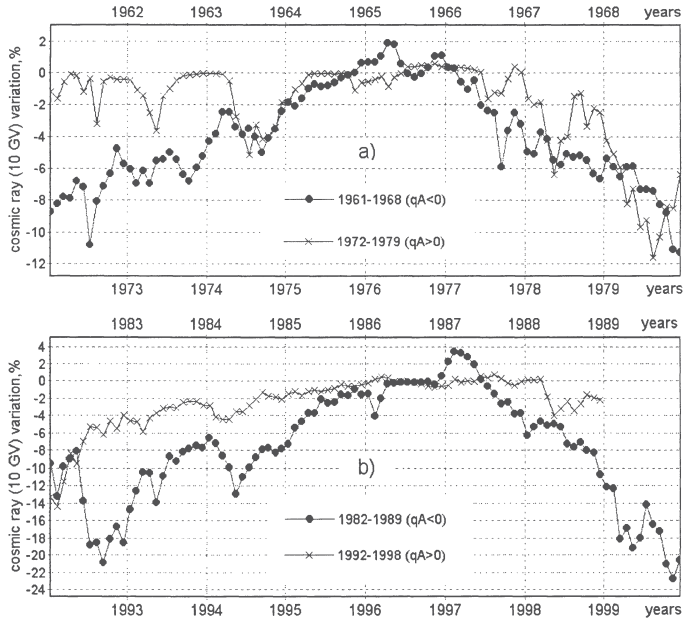


Figura 14 – Variação no fluxo de RCG em dois ciclos solares consecutivos sobrepostos (BELOV, 2000)

períodos de atividade solar moderada, observa-se cenário inverso. A deriva da Lâmina de Correntes Helisféricas facilita o acesso de partículas cósmicas às regiões mais internas da Heliosfera durante os períodos de polaridade positiva, enquanto que durante os períodos de polaridade negativa, o mesmo processo dificulta tal acesso (BELOV, 2000; FLORINSKI, FERREIRA, POGORELOV, 2011).

A figura 14 mostra essa diferença na modulação no fluxo de Raios Cósmicos em dois ciclos solares consecutivos. Tanto na parte (a) quanto na parte (b), percebe-se que o fluxo de RCG nos ciclos onde a polaridade foi positiva (i.e $qA > 0$) mantivera-se mais elevado, durante as fases iniciais e finais dos respectivos ciclos, quando comparado com o ciclo sequente. Quadro inverso observa-se no máximos solares, onde o fluxo de Raios Cósmicos fora maior para os ciclos onde a polaridade fora negativa (i.e $qA < 0$) (BELOV, 2000). Além disso, conforme Frigo et al (2018), durante as transições dos ciclos pares para os ímpares, o fluxo de Raios Cósmicos permanece em máximo durante um período de tempo mais longo do que durante as transições dos ciclos ímpares para os pares. Entre o momento em que as partículas de Raios Cósmicos penetram na Heliosfera e o momento em que atingem a atmosfera terrestre, elas interagem com o plasma do vento solar e com o campo magnético do meio interplanetário, o qual foi emitido ou perturbado em diferentes momentos do passado. Logo, as observações sobre as atuais condições dos Raios Cósmicos não estão apenas condicionadas às atuais condições do Sol, mas também as suas condições de dias, meses e até mesmo anos atrás. Esse atraso entre as variações na atividade solar e o fluxo de Raios Cósmicos é denominada de histerese de Raios Cósmicos (BELOV, 2000).

A figura 15 mostra quatro curvas de histerese para o fluxo de RCG em função do número médio de manchas solares. Pelos gráficos, percebe-se que os ciclos ímpares

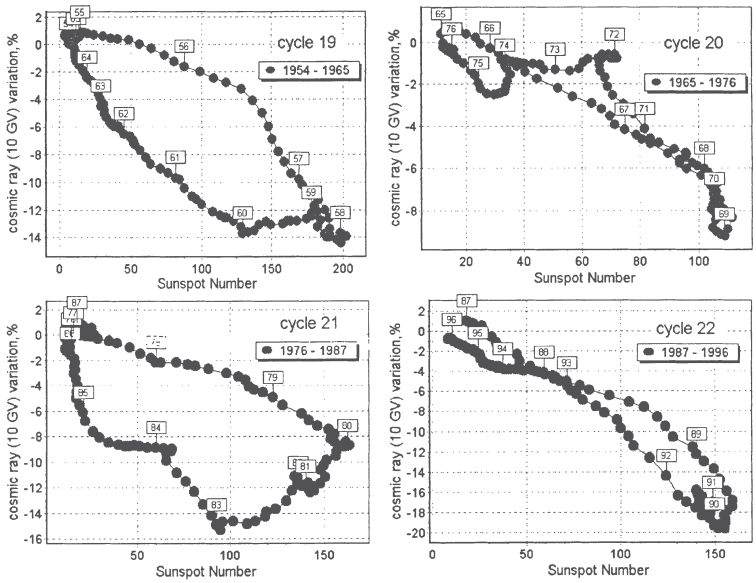


Figura 15 – Relação entre o número médio de manchas solares e a variação no fluxo de RCG para quatro ciclos solares consecutivos (BELOV, 2000)

possuem uma curva mais larga, enquanto que os ciclos pares possuem um *loop* mais fino. Essa alternância entre curvas mais largas para curvas mais estreitas pode estar diretamente relacionada com o ciclo de reversão do campo magnético solar, pois enquanto que os ciclos mais largos estão associados às reversões positivo - negativo do campo magnético solar, os ciclos mais estreitos estão associados às reversões negativo - positivo (BELOV, 2000).

Conforme Shrivastava (2003) *apud* Shrivastava et al (2011) o ocorrência das erupções solares estão diretamente relacionadas com um evento denominado de *Decréscimo de Forbush* (dF), que consiste em uma súbita diminuição na intensidade de fluxo de Raios Cósmicos seguida de uma recuperação gradativa. Tais diminuições está sempre associada aos eventos intensas erupções/explosões solares, rajadas de vento solar e perturbações no campo magnético interplanetário. Shrivastava (2003) *apud* Shrivastava et al (2011) afirma que as maiores erupções solares ocorrem na faixa latitudinal entre os paralelos solares de 15º e 30º Norte, enquanto que aquelas ocorrentes no fuso horário solar compreendido entre os meridianos 0º e 30º Leste são os mais efetivos para o ocorrência dos dF. Contudo, pesquisas feitas por Shrivastava e Singh (2005) *apud* Shrivastava (2011) apontou que durante o ciclo solar de número 22, as erupções ocorridas dentro do fuso horário compreendido entre 0º e 40º Oeste foram mais efetivos para a ocorrência dos dF. Já durante o ciclo de número 23, a região mais efetiva estivera situada entre as longitudes solares de 10º Leste e 60º Oeste (SHRIVASTAVA ET AL. 2011).

Um estudo feito pelos últimos autores supracitados, para o período compreendido entre 2001 e 2006, buscou uma correlação entre as ocorrências de erupções solares e os decréscimos de *Forbush*. Durante esse período, foram detectados 46 dF onde a diminuição na intensidade de fluxo de Raios Cósmicos foi maior ou igual a 3%. Além disso, Shrivastava et

al (2011) diz que as erupções solares associados aos dF estão aproximadamente distribuídos de forma homogênea sobre o disco solar, embora o hemisfério ocidental mostre uma frequência levemente mais elevada, quando comparada com o hemisfério solar oriental. Yoshida e Akasofu (1965) *apud* Shrivastava et al (2011) afirma que os eventos solares sobre o lado oeste do Sol são mais efetivos em provocar os dF do que aqueles que ocorrem no lado oriental. Contudo, os dF causados pelos eventos ocorridos no lado oriental provocam dF mais intensos do que aqueles eventos ocorridos no lado ocidental (SHRIVASTAVA ET AL, 2011).

3.4 Atmosfera Terrestre

3.4.1 Aspectos gerais da atmosfera

Define-se por Atmosfera um envelope massivo inodoro, incolor e insípido, composto por moléculas gasosas e preso à Terra pela ação da força gravitacional, e misturadas de forma mecânica (SONNEMAKER, 2009; BANCY, 2013). Da superfície terrestre até uma altitude de aproximadamente 110 km, a dinâmica das massas de ar fazem com que a atmosfera tenha aspecto homogêneo, e a concentração média de seus constituintes, um comportamento aproximadamente constante em função da altitude. Tal camada atmosférica é denominada de **homosfera**. Acima desse nível, a composição da atmosfera torna-se sujeita a processos de estratificação difusivos, devido as diferentes massas moleculares, e a fortes reações químicas e fotoquímicas. Tal camada é denominada de **heterosfera** (CURRY e WEBSTER, 1999). O ar atmosférico é compressível e elástico, não é um bom condutor elétrico ou calorífero, a menos que esteja saturado de umidade e ionizado (SONNEMAKER, 2009). A tabela 5 mostra a composição do ar seco atmosférico dentro de em extensão que vai da superfície até uma altitude de 25 km (SAHA, 2008).

Gás constituinte	Percentual em Massa	Percentual em Volume	Peso Molecular
Nitrogênio (N_2)	75,51	78,09	28,02
Oxigênio (O_2)	23,14	20,95	32,00
Argônio (Ar)	1,3	0,93	39,94
Dióxido de Carbono (CO_2)	0,05	0,03	44,01
Neônio (Ne)	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$	20,18
Hélio (He)	$8,0 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-4}$	4,00
Criptônio (Kr)	$2,9 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	83,7
Hidrogênio (H_2)	$0,35 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	2,02
Xenônio (X)	$3,6 \times 10^{-5}$	$0,8 \times 10^{-5}$	131,3
Ozônio (O_3)	$0,17 \times 10^{-5}$	$0,1 \times 10^{-5}$	48,0

Tabela 5 – Composição do ar seco atmosférico (SAHA, 2008)

3.4.2 Definição e formação de nuvens

Define-se por nuvem um conjunto de partículas microscópicas de matéria, como gotículas de água ou cristais de gelo, em suspensão na atmosfera. Ela resulta do resfriamento direto do ar até o ponto onde a condensação ou sublimação possam ser constatadas, e para ser considerada como tal, é necessário que a sua base esteja a no mínimo 30 metros de altura. A uma temperatura interna entre zero e -10^{o} C, as nuvens são compostas majoritariamente por gotículas de água super-resfriadas, enquanto que, aquelas cuja temperatura esteja abaixo de dez graus Celsius negativos, majoritariamente por cristais de gelo. O primeiro caso citado é a condição mais favorável à formação de gelo nas aeronaves (BANCI, 2013).

A condição mais favorável para a formação e desenvolvimento das nuvens é o ar estar saturado, a qual pode ser atingida através do resfriamento, adição de umidade e mistura mecânica. O primeiro consiste na diminuição da temperatura do ar até que o mesmo atinja o **ponto de orvalho** (STULL, 2015), definida como a temperatura para a qual o ar deve ser resfriado até se tornar saturado, com a quantidade de vapor de água que contém (FAA, 1975). O segundo processo consiste na adição de umidade, afim de que a atual temperatura do ar seja o ponto de orvalho (STULL, 2015).

O componente atmosférico fundamental à formação das nuvens é o vapor de água. Na troposfera, a água está constantemente sendo transportada e mudando de estado físico, ora estando na fase gasosa, como nas nuvens, ora estando no estado líquido. Isso faz com que o teor de água na troposfera seja altamente variável. Nas latitudes mais elevadas, o tempo de vida útil do vapor de água na atmosfera é de aproximadamente 15 dias, enquanto que, nas latitudes próximas a linha do equador, 8 dias (PRUPPACHER, 1973).

A formação e desenvolvimento das nuvens ocorrem a partir do resfriamento adiabático de massas de ar ascendentes. Para que tal processo termodinâmico ocorra de forma adiabática úmida, é necessário que a troca de calor entre a massa de ar em condensação/evaporação e o ar em no entorno ocorra em um intervalo de tempo suficientemente pequeno para não surgir qualquer gradiente térmico (MÖLLER, 1951). A ascensão do ar pode ocorrer tanto em função da diminuição de densidade dessa parcela de ar, gerando assim as nuvens cumuliformes, ou pode ocorrer pela ação de agentes mecânicos os quais obrigam o ar a se deslocarem aos níveis mais elevados. Tais agentes podem ser resultado tanto do relevo local, quanto da presença de sistemas frontais. Uma vez formada, o topo das nuvens passam a emitir radiações de ondas longas, fazendo com que sejam preservadas durante mais tempo (STULL, 2015).

As partes de uma nuvem pode ser aquecida/resfriada tanto via condução quanto

via radiação. As fronteiras de uma nuvem são uma região de troca de calor entre a nuvem e o ambiente. A evaporação de água líquida e o consequente aumento da umidade do ar no entorno da nuvem faz com que ela troque calor com o meio, via condução, ficando mais fria. Esse processo torna-se importante para a manutenção das nuvens do tipo cúmulus e stratus, cuja sustentação depende da inversão térmica (MÖLLER, 1951).

Tão importante quanto a condução, tem-se a transferência de energia via radiação. De toda radiação solar incidente sobre o topo da nuvem, entre 50% e 70% é refletida de volta para o espaço, sendo apenas uma pequena parte absorvida. Contudo, para as ondas longas, o cenário é totalmente diferente. Uma nuvem pode ser aproximada a um corpo negro cujo pico de emissividade encontra-se entre 4 e 100 μm. Para esse espectro eletromagnético, as nuvens podem emitir ou absorver grandes quantidades de energia. Na parte inferior da nuvem, a radiação emitida pelas gotículas de água são contrabalanceadas pela radiação terrestre, fazendo com que a nuvem permaneça aquecida (MÖLLER, 1951).

Toda e qualquer partícula de matéria sólida ou líquida que esteja em suspensão em um meio gasoso é denominada de **aerossol**. Na atmosfera terrestre, os aerossóis mais encontrados são os silicatos, tais como o Cloreto de Sódio, o Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$), Cloreto de Magnésio ($MgCl_2$), Cloreto de Amônia (NH_4Cl), entre outros. As dimensões dessas partículas variam de 6×10^{-8} cm, para pequenos íons, até $1,5 \times 10^{-2}$ cm para grandes partículas (PRUPPACHER, 1973). Os aerossóis funcionam como **Núcleos de Condensação**. Uma vez que algumas dessas partículas possui alguma afinidade química com a água, elas podem induzir processos de condensação ou sublimação em condições em que o ar não esteja necessariamente saturado (FAA, 1975).

Os aerossóis podem ser classificados como: (i) partículas insolúveis em água ou hidrofóbicas, as quais requerem acentuadas condições de supersaturação; (ii) partículas insolúveis em água, porém hidrofílicas. Nesse caso, conforme o grau de umidade do ambiente e o grau de afinidade dessas partículas com a água, elas podem ser envelopadas por várias camadas de moléculas de H_2O; e (iii) as gotas de solução, que consistem de soluções aquosas as quais não necessitam de um grau elevado de supersaturação. Embora todo tipo de partícula possa atuar como um núcleo de condensação, somente aquelas que demandam um baixo teor de saturação na atmosfera podem exercer alguma função (JUNGE, 1951).

Os núcleos de condensação podem ser tanto de origem natural quanto de origem antropogênica. Por exemplo, os aerossóis de Sulfato podem ter origem natural quando são expelidos pelas erupções vulcânicas, como também podem ser oriundos das queimas de combustíveis fósseis (CURRY e WEBSTER, 1999). A formação dos núcleos de condensação na fumaças das combustões se dá devido a condensação ou sublimação de compostos

químicos de elevado ponto de ebulição. Todavia, tais partículas tornam-se mais efetivas após viajarem por longas distâncias, onde reagem com outros gases ou sofrem reações fotoquímicas (JUNGE, 1955).

Dentre os gases importantes para a formação das nuvens tem-se: (i) o Ozônio, o qual reage com o os óxidos nítricos ou o SO_2, produzindo o Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2); os Óxidos de Nitrogênio (NO e NO_2), os quais são oriundos das descargas elétricas, das interações entre a radiação solar em UV e das queimadas; (iii) íons de Cloro advindos dos mares e oceanos; (iv) íons de amônio (NH_4^+), resultantes da decomposição de substâncias orgânicas; (v) e outros (JUNGE, 1955). Os oceanos também atuam como fontes de núcleos de condensação, uma vez que o sal marinho por eles expelidos são úteis para os processos de condensação do vapor de água (CURRY e WEBSTER, 1999).

Sobre as superfícies dos oceanos, perturbações fazem com que grandes quantidades de água salgada sejam borrifadas para a atmosfera, permitindo assim que os sais marinhos sejam suspensos e elevados a grandes altitudes, dentro das massas de ar marítimas. Sobre os continentes, tempestades são capazes de por partículas de poeira ou areia em suspensão na atmosfera. Tais partículas podem ser levadas a longas distâncias, influenciando assim a cobertura de nuvens de regiões distantes da sua origem (JUNGE, 1955).

3.4.3 Efeitos dos Raios Cósmicos na Atmosfera

O fluxo de partículas extraterrestres que penetram a alta atmosfera terrestre varia com a atividade solar, intensidade do campo geomagnético e energia das partículas. O campo magnético terrestre blinda o planeta Terra contra essa penetração de partículas. O poder de blindagem, conhecido como **Rigidez de Corte**, varia com as coordenadas geográficas, sendo mais intenso nas regiões próximas à Linha do Equador e mais fraco nos Polos Magnéticos da Terra. Destarte, os detectores de partículas localizados próximos as calotas polares são capazes de detectar os Raios Cósmicos em todo o seu espectro de energia, enquanto que aqueles situados próximos à Linha do Equador detectam somente as partículas mais energéticas, capazes de vencer a rigidez de corte local (VICHARE ET AL, 2018).

Quando partículas eletricamente carregadas atravessam, em alta velocidade, um determinado meio, elas interagem com os átomos desse meio, arrancando-lhes os elétrons e provocando a excitação e ionização desses átomos. Na medida em que tais partículas vão sofrendo colisões, elas vão perdendo energia, e consequentemente, a sua capacidade de ionização (BIWAS, 2000). Partículas de Raios Cósmicos primários e alguns secundários desempenham importante papel na sintetização dos Núcleos de Cosmogênicos na atmosfera,

nos oceanos e subsolos. Enquanto isso, partículas secundárias atuam na ionização do ar e em processos químicos importantes, como a formação dos nitratos e da camada de Ozônio (DORMAN, 2004).

Raios Cósmicos Primários com energia igual ou superior a 100 GeV produzem um efeito cascata quando penetram na atmosfera terrestre, produzindo grandes quantidades de partículas secundárias, tais como $e^{\pm}$, $\mu^{\pm}$ e $\pi^{\pm}$, sendo que algumas delas podem ser detectadas até mesmo no nível do solo. Grandes quantidade de $e^{\pm}$, cuja velocidade é superior a 10% da velocidade da luz, geram fótons de *Cerenkov*, os quais atingem o solo na forma de pulso de luz com uma duração de 20 nanossegundos e se espalham dentro de um raio de aproximadamente 100 metros (BHAT, 2012).

Nêutrons, Prótons e Píons resultantes da interação de partículas primárias com os gases atmosféricos são os principais responsáveis por desencadear esse efeito cascata. O decaimento dos Píons eletricamente carregados produzem Múons, enquanto que o decaimento dos Píons neutros produzem Raios Gama, conforme as equações abaixo (DORMAN, 2004):

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu} \tag{3.7}$$

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \nu_{\mu} \tag{3.8}$$

$$\pi^{0} \rightarrow \gamma + \gamma \tag{3.9}$$

O desenvolvimento dessa cascata de partículas pode ser investigado através das emissões de ondas de luz fluorescente emitidos pelos átomos de Nitrogênio que interagem com as partículas precipitantes e são excitados. A profundidade longitudinal máxima dessa cascata de partículas depende diretamente da massa das partículas primárias. O componente hadrônico dessa cascata é composto majoritariamente de Píons os quais se degeneram em fótons quando no estado neutro, e quando eletricamente carregados, interagem com os gases da atmosfera (BONCIOLI, 2014). Todavia, as partículas de Raios Cósmicos Primários são absorvidas muito rapidamente pela atmosfera, fazendo com que o seu fluxo próximo ao nível do mar seja desprezível, quando comparado ao fluxo de

partículas secundárias. Estas últimas interagem até com os oceanos e solo, permitindo assim que partículas como Múons relativísticos, Pósitrons e Neutrinos secundários possam ser encontrados em tais lugares (DORMAN, 2004).

Pesquisas mostram que variações na temperatura global, especialmente sobre o Hemisfério Norte, podem estar intrinsecamente associadas com as variações de longo prazo do nível de atividade solar, tornando assim conclusivo que a extensão dos ciclos solares sejam fortes indicadores de variações climáticas de longo prazo. Comparações feitas entre as séries temporais relativas a temperatura para períodos anteriores a 1880 têm apontado para uma forte correlação entre as variações térmicas e a extensão dos ciclos solares (SVENSMARK e FRIIS-CHRISTENSEN, 1997).

A justificativa mais plausível até então seria a de que as variações na RTS - Radiação Total do Sol eram grandes o suficientes para provocar tais oscilações na temperatura. Todavia, pesquisas posteriores concluíram que tais variações térmicas ocorriam de forma mais pronunciada dentro da troposfera, e que as variações na RTS não eram suficientemente elevadas para causar as grandes mudanças de temperatura observadas (SVENSMARK e FRIIS-CHRISTENSEN, 1997). Dickinson (1975) *apud* Svensmark e Friis-Christensen (1997) percebeu que essa relação se dava por variações significativas na absorção de radiação solar e/ou emissão de ondas em Infravermelho, pela baixa atmosfera e superfície da Terra. Seguindo esse ideia, ele pontuou que tais variações deveriam se apoiar na variação da cobertura de nuvens, cujo processo se daria pela ionização desencadeada pelas partículas de Raios Cósmicos, que por sua vez, são responsáveis pela síntese dos aerossóis, os quais atuam como Núcleos de Condensação para a formação da nuvens.

A ionização dos gases atmosféricos após a sua interação com partículas extra-terrestres induz a produção de radionuclídeos cosmogênicos. tais como ^{3}He, ^{10}Be, ^{14}C, ^{14}Ne, ^{28}Al e ^{36}Cl, cuja concentração depende de fatores como o fluxo de Raios Cósmicos e a circulação atmosférica (FERNANDES, 2017). De acordo com Hathaway (2015), a produção dos radioisótopos ^{14}C e ^{10}Be resulta da interação entre as partículas cósmicas e os átomos de Nitrogênio (^{14}N) e Oxigênio (^{16}O) em suspensão na atmosfera. O isótopo Carbono-14 reage com o Oxigênio, formando o Dióxido de Carbono. Por sua vez, o CO_2 é captado pelas plantas, quando elas fazem a sua fotossíntese. Isso faz com que o isótopo ^{14}C fique armazenado nos anéis de crescimento dos troncos de árvores. O ^{10}Be, por sua vez, se oxida e fica preso aos aerossóis suspensos na atmosfera. Em seguida, ele se precipita em forma de neve e se deposita em camadas de gelo. Diante disso, a concentração de ^{14}C e ^{10}Be nos anéis de árvores e camadas de gelo servem como uma medida indireta dos ciclos solares das eras remotas (BEER, 2000) e (HATHAWAY, 2015).

3.4.3.1 Efeito dos Raios Cósmicos na Cobertura de Nuvens

Entre os primeiros trabalhos que relacionaram a cobertura de nuvens com a incidência de Raios Cósmicos, tem-se o trabalho de Svensmark e Friis-Christensen (1997), onde foi feito um levantamento de relação entre o fluxo de Raios Cósmicos e dados, coletados a partir de satélites geoestacionários, relacionados com a cobertura de nuvens sobre áreas oceânicas. A partir da compilação de dados relacionados à cobertura de nuvens obtidos por satélites geoestacionários e de órbitas polares, esses autores foram um dos pioneiros em relacionar o clima da baixa atmosfera com os ciclos solares.

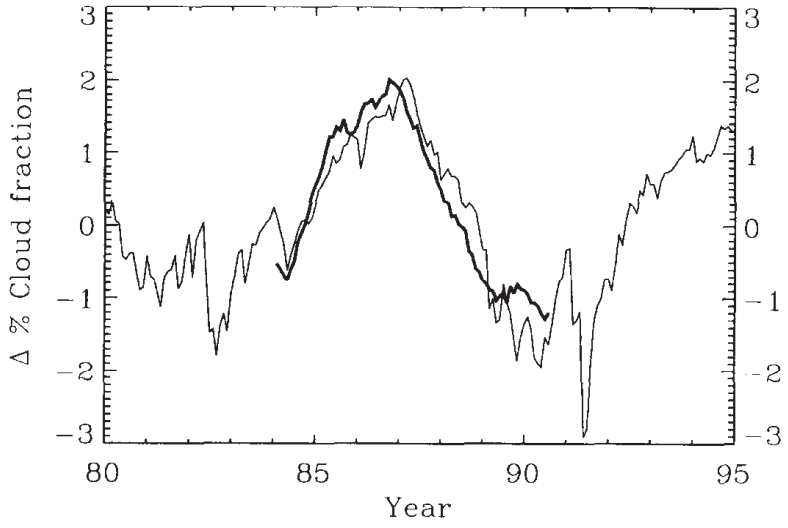


Figura 16 – Variações percentuais das médias diárias de cobertura de nuvens obtidas a partir de satélites geoestacionários sobre as áreas oceânicas entre 1984 e 1990 (curva mais espessa). A curva mais fina representa o fluxo médio normalizado de Raios Cósmicos obtido a partir do Centro de Monitoramento de Climax - Colorado/EUA (SVENSMARK e FRIIS-CHRISTENSEN, 1997)

A figura 16 mostra a variação percentual anual da cobertura de nuvens sobre as áreas oceânicas, obtidas a partir do imageamento de satélites geoestacionários, juntamente com a variação anual de fluxo de Raios Cósmicos, obtido pelo Centro de Monitoramento de Climax (Colorado - EUA). Percebe-se nesse gráfico a ocorrência de uma variação mais pronunciada, entre 3% e 4%, durante os anos de 1986 e 1987, ou seja, durante um mínimo de atividade solar (SVENSMARK e FRIIS-CHRISTENSEN, 1997).

A figura 17 mostra uma composição de dados de cobertura de nuvens obtidos pelos programas *NIMBUS-7 CMATRIX project* (triângulos), ISCCP - International Satellite Cloud Climatology Project (quadrados) e DMSP - Defense Meteorological Satellite Program SSM/I - Special Sensor Microwave/Imager. Devido às diferenças temporais e espaciais nos dados obtidos por esses satélites, foi utilizado apenas os dados em comum aos quatro

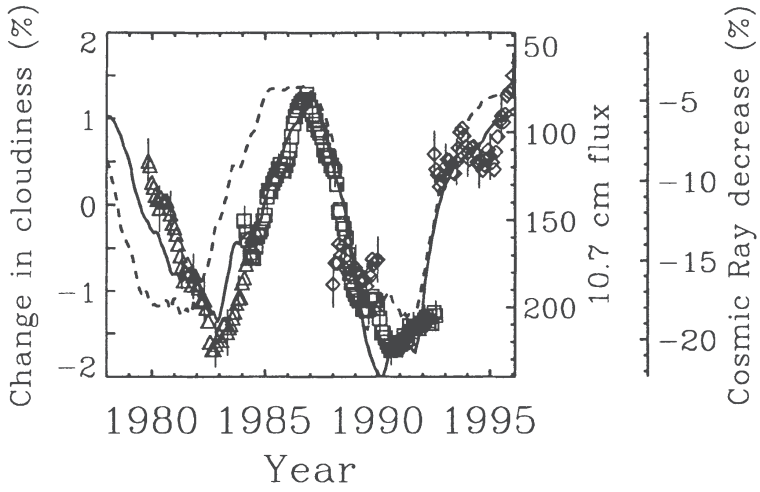


Figura 17 – Composição de dados sobre cobertura de nuvens obtidos a partir de quatro satélites distintos (polígonos); fluxo de Raios Cósmicos obtido a partir de Climax - Colorado/EUA (linha contínua); fluxo solar F10.7 (linha pontilhada) (SVENSMARK, 2000)

satélites, de modo que, a variação na cobertura de nuvens mostrada na figura 17 refere-se apenas sobre os oceanos e fora das faixas tropicais (SVENSMARK, 2000). Estudos feitos por Harrison e Stephenson (2006) *apud* Vieira e Silva (2006) mostraram que sobre o território do Reino Unido, nos dias em que se teve uma elevada taxa de penetração de Raios Cósmicos (acima de 36.000 Nêutrons a cada hora), a probabilidade de se ter um dia de céu totalmente encoberto aumentava em 19%, com uma margem de erro de ±4%.

A figura 18 mostra os resultados obtidos por Voiculescu et al (2006) referentes a correlação entre a cobertura de nuvens de nível baixo e o fluxo de Raios Cósmico/Radiação Solar em UV - Ultravioleta. O mapa mostrado na figura 18 mostra uma predominância de áreas onde se observa uma correlação negativa entre a cobertura de nuvens baixas e a radiação solar em Ultravioleta. Correlações positivas entre o fluxo de Raios Cósmicos e a quantidade de nuvens baixas encontram-se em áreas mais restritas, contudo, bem definidas. Além disso, é possível observar algumas áreas onde a cobertura de nuvens baixas possuem uma correlação negativa com os Raios Cósmicos, como em alguns setores oceânicos próximos a linha do equador, Caribe oriental, parte oeste do Peru e em algumas partes do Pacífico (VOICULESCU ET AL, 2006).

Pela figura 18 percebe-se também que os Raios Cósmicos influenciam a cobertura de nuvens em áreas continentais do Hemisfério Norte onde o clima é predominantemente úmido, assim como em setores oceânicos de altas latitudes. O mecanismo dessa correlação apoia-se no aumento da produção dos núcleos de condensação, que por sua vez, depende da concentração de aerossóis. É provável que esta forte correlação sobre o continente europeu e

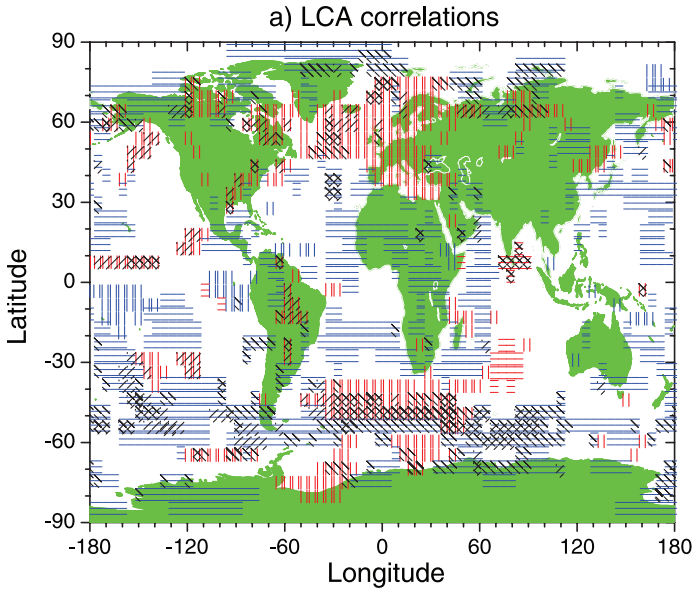


Figura 18 – Distribuição geográfica das relações entre a incidência de Raios Cósmicos, Radiação Solar em UV e cobertura de nuvens de nível baixo. As faixas horizontais denotam a relação entre a cobertura de nuvens e a radiação em UV, enquanto que as faixas verticais, a correlação entre a cobertura de nuvens e o fluxo de Raios Cósmicos. A cor vermelha denota correlação positiva enquanto que a cor azul, correlação negativa (VOICULESCU ET AL, 2006)

norte-americano deva-se às elevadas atividades industriais nessas regiões, fazendo com que a concentração de partículas em suspensão na atmosfera seja mais elevada (VOICULESCU ET AL, 2006).

A figura 19 mostra os resultado obtidos por Voiculescu et al (2006) para cobertura de nuvens de nível médio. É possível observar uma correlação negativa entre o fluxo de Raios Cósmicos e a cobertura de nuvens em algumas áreas limitadas, como a parte ocidental do Atlântico equatorial e tropical, em ambos hemisférios; a porção central do Pacífico entre os paralelos 0 e 30º N; a porção central do Oceano Índico; e a parte oriental da América do Norte. Também é possível observar a presença de regiões onde se observa uma correlação positiva entre o fluxo de RC e cobertura de nuvens de nível médio, tais como áreas oceânicas no entorno da América Central e próximas à costa peruana. É importante frisar que, tal comportamento é o inverso daquele observado para a cobertura de nuvens baixas (VOICULESCU ET AL, 2006).

Por fim, a figura 20 mostras os resultados obtidos por Voiculescu et al (2006) para as nuvens de nível alto, onde é possível perceber que as áreas onde observa-se uma relação negativa entre o fluxo de RC e a cobertura de nuvens é maior do que aquelas onde se observa uma relação positiva. É possível observar uma anticorrelação entre essas duas medidas sobre o Oceano Pacífico entre os paralelos 50º S e 30º N, exceto para a faixa equatorial sobre o Pacífico central e ocidental. Essa correlação negativa estende-se às altas latitudes ao longo da costa leste Norte Americana, podendo também ser observada

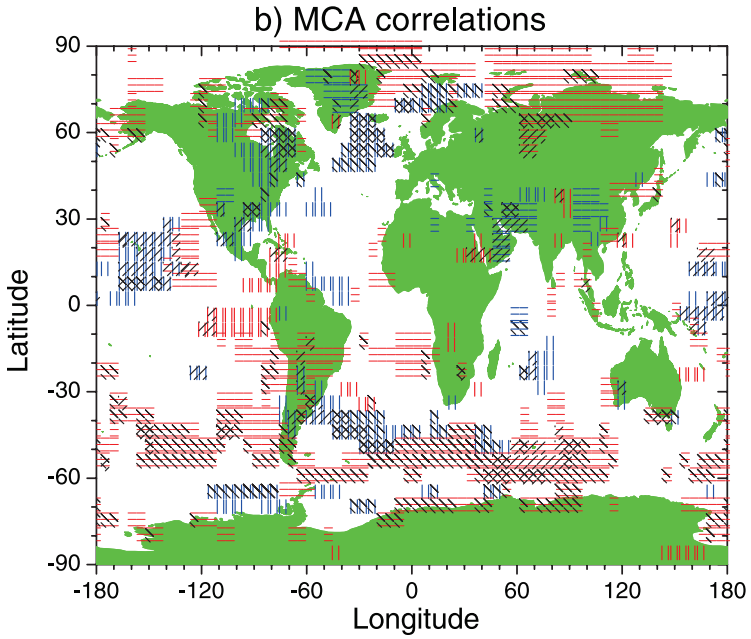


Figura 19 – Distribuição geográfica das relações entre a incidência de Raios Cósmicos, Radiação Solar em UV e cobertura de nuvens de nível médio. As faixas horizontais denotam a relação entre a cobertura de nuvens e a radiação em UV, enquanto que as faixas verticais, a correlação entre a cobertura de nuvens e o fluxo de Raios Cósmicos. A cor vermelha denota correlação positiva enquanto que a cor azul, correlação negativa (VOICULESCU ET AL, 2006)

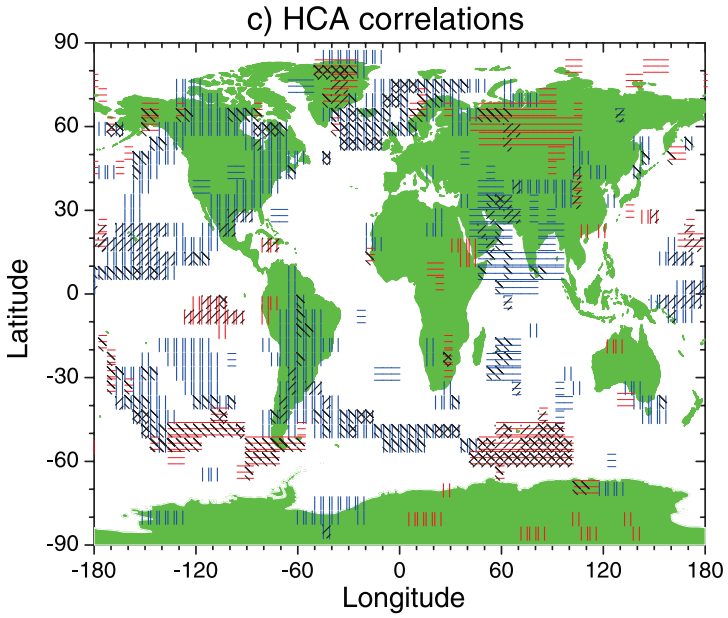


Figura 20 – Distribuição geográfica das relações entre a incidência de Raios Cósmicos, Radiação Solar em UV e cobertura de nuvens de nível alto. As faixas horizontais denotam a relação entre a cobertura de nuvens e a radiação em UV, enquanto que as faixas verticais, a correlação entre a cobertura de nuvens e o fluxo de Raios Cósmicos. A cor vermelha denota correlação positiva enquanto que a cor azul, correlação negativa (VOICULESCU ET AL, 2006)

próxima à Indonésia. Semelhante à casos anteriores, observa-se também uma correlação negativa sobre algumas áreas do Oceano Atlântico, próximo aos paralelos 50º Norte e Sul (VOICULESCU ET AL, 2006).

Quanto às regiões continentais, observa-se uma correlação negativa sobre o Canadá, costa leste norte americana, sobre quase a totalidade da América do Sul, partes da Ásia oriental e sobre algumas áreas do continente africando, próximas ao mediterrâneo. Além disso, é possível observar uma correlação positiva entre as duas medidas sobre algumas áreas a oeste do Peru (VOICULESCU ET AL, 2006).

De acordo com Frigo et al (2018), a intensidade do campo geomagnético sobre a América do Sul tem sido fortemente influenciada pela passagem da AMAS - Anomalia Magnética do Atlântico Sul, cujo centro pode ser definido como um ponto onde observa-se uma baixa magnitude no campo magnético terrestre. Como resultado de mudanças anômalas no sistema de correntes elétricas contidas no interior da Terra, observa-se que a AMAS tem-se deslocado so sentido oeste no decorrer dos anos (VIEIRA e SILVA, 2006), conforme exposto na figura 21.

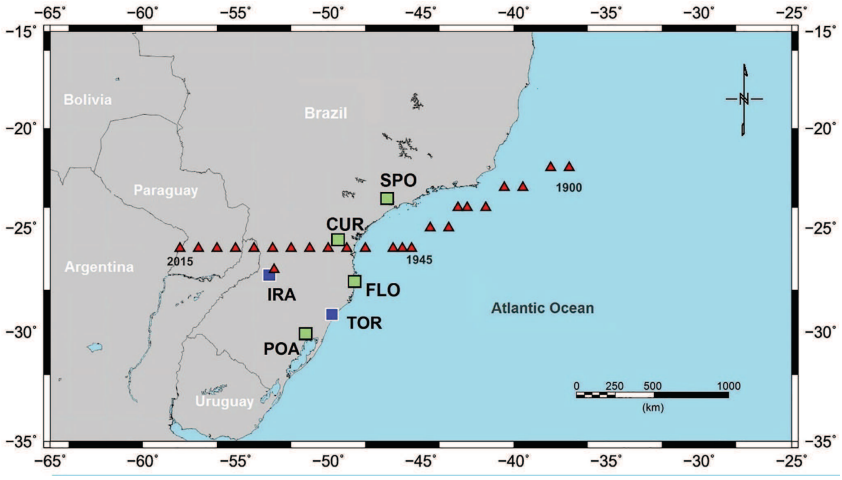


Figura 21 – Deslocamento da AMAS entre os anos de 1900 e 2015, representado pelos triângulos vermelhos (FRIGO et al, 2018)

Entre os anos de 1900 e 1945, o cerne da AMAS deslocou-se no sentido sudoeste, mantendo a uma distância fixa e pequena da costa brasileira e próximas aos estados do RJ, SP e PR. Após 1945, a AMAS manteve-se em deslocamento latitudinal, seguindo o paralelo 26º Sul no sentido oeste (FRIGO et al, 2018). Essa anomalia é causada por uma excentricidade no dipolo geomagnético e pela presença de perturbações em multipolo , os quais provocam uma séries de fenômenos sobre o Hemisférios Sul, os quais interferem diretamente a magnetosfera e a ionosfera (VIEIRA e SILVA, 2006).

Dados do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) mostraram que a magnitude do campo geomagnético no cerne da AMAS decresceu de 25.500 nT para aproximadamente 22.500 nT desde o ano de 1900. Uma vez que a intensidade de fluxo de

RC é dependente da blindagem oferecida pela magnetosfera (i.e rigidez de corte), é de se esperar uma maior penetração de partículas extraterrestre na área de influência da AMAS (VIEIRA e SILVA, 2006; FRIGO et al, 2018).

Um estudo por Frigo et al (2018) investigou os possíveis efeitos das variações das atividades solares sobre as condições meteorológicas da região sobre influência a AMAS. Tal investigação se deu através de análises de séries temporais relacionadas à temperatura, para o período entre 1936 e 2014, coletadas a partir das cidades de Torres e Iraí, ambas localizadas na região Sul do Brasil. É importante salientar que o cerne da AMAS estivera muito próximo ao município de Iraí entre os anos de 1980 e 1995.

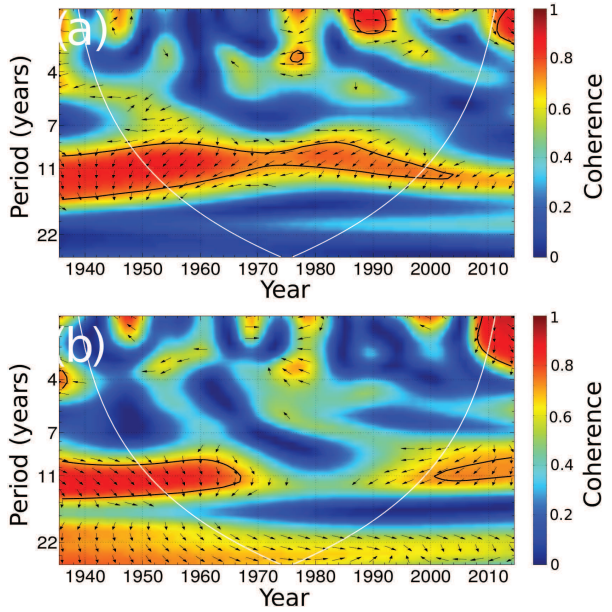


Figura 22 – Análise Wavelet para as séries temporais relativas ao ciclo de manchas solares de 11 anos e a temperatura nas cidade de Torres (a) e Iraí (b) (FRIGO et al, 2018)

Através da Análise Wavelet[1] entre as séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares e a temperatura para o município de Torres, obteve-se um índice de coerência superior a 0,7 para periodicidades de 11 anos, durante quase todo o período de estudo. Quanto a cidade de Iraí, níveis de coerência próximos a 1 foram detectados entre 1940 e 1965, e valores superiores a 0,65 após o ano de 1990. Os resultados estão expostos na figura 22 (FRIGO et al, 2018).

Ao aplicar a Análise Wavelet para o ciclo de polaridade solar, de 22 anos, e a temperatura para essas duas cidades, Frigo et al (2018) observou um elevado índice de coerência e uma oposição de fase, para uma periodicidade igual a 22 anos, durante todo o período de estudo, para o município de Iraí, conforme indicado pela extensa faixa avermelhada na parte inferior do painel (b) da figura 23 e pelas setas voltadas para o lado

[1] Para maiores detalhes sobre a Análise Wavelet, vide seção "Metodologia"presente nesse trabalho

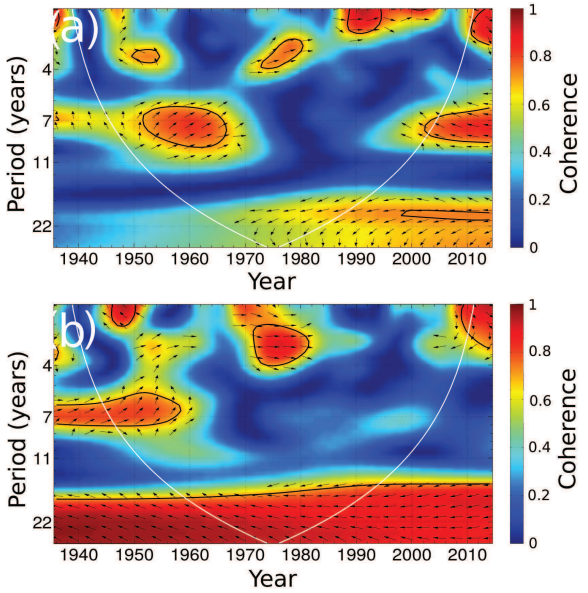


Figura 23 – Análise Wavelet para as séries temporais relativas ao ciclo de manchas solares de 22 anos e a temperatura nas cidade de Torres (a) e Iraí (b) (FRIGO et al, 2018)

esquerdo. Quanto ao município de Torres, índices de coerência superiores a 0,6 foram observado após o ano de 1970, considerando uma periodicidade de 22 anos. Nessa região, as setas voltadas para a esquerda indicam uma oposição de fase (parte (a) da figura 23) (FRIGO et al, 2018).

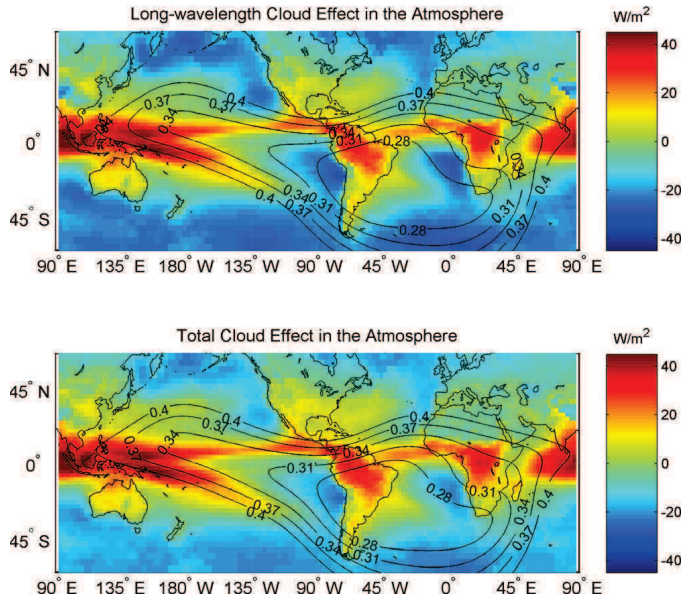


Figura 24 – Média anuais de radiação eletromagnética de longo comprimento de onda (entre 5 e 200 μm) e o efeito total das nuvens no fluxo radiativo dentro da atmosfera entre os anos de 1983 e 2001. As linhas pretas correspondem a curvas de nível de magnitude de campo magnético ao nível do solo para o ano de 1990 (VIEIRA e SILVA, 2006)

Um outro estudo semelhante ao de Frigo et al (2018) foi conduzido por Vieira e Silva (2006), onde procurou-se explicar os efeitos da cobertura de nuvens no equilíbrio radiativo da atmosfera sobre o Pacífico meridional, o qual estivera sob interferência da

AMAS entre os anos de 1983 e 2001. A figura 24 mostra a média anual do fluxo radiativo em ondas longas ($\lambda = 5\ 200\ \mu m$) no painel superior, e o efeito total das nuvens na parte inferior, ambos válidos para o período entre os anos de 1983 e 2001. A figura 24 mostra também curvas de nível com respeito a magnitude de campo magnético ao nível do solo, as quais permitem perceber o efeito da AMAS. Em ambas as partes dessa figura, é possível perceber um alongamento das curvas de nível na região oriental do Pacífico. Enquanto que no interior desse setor observa-se intensas perdas radiativas, no seu entorno, percebe-se elevados ganhos. Esse balanço radiativo se deve a uma redução na cobertura de nuvens de alto e médio nível, somado com acréscimo na cobertura de nuvens de baixo nível (VIEIRA e SILVA, 2006).

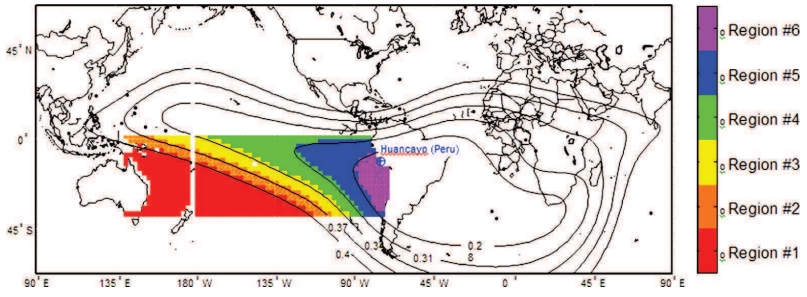


Figura 25 – Divisão da área de estudo conforme a intensidade do campo geomagnético. As regiões 1,2 e 3 possuem campo magnético mais intenso do que as regiões 4, 5 e 6, as quais estão sob a influência da AMAS (VIEIRA e SILVA, 2006)

A área de estudo foi dividade em seis setores, conforme mostrado na figura 25, de acordo com a magnitude do campo geomagnético, e foram consideradas como variáveis alvo os efeitos anômalos da cobertura de nuvens no balanço radiativo das ondas curtas e longas, assim como o fluxo radiativo líquido. Todos esses valores foram dados em termos dos desvios das médias mensais (VIEIRA e SILVA, 2006).

Coletados e analisados os dados, Vieira e Silva (2006) concluíram que o fluxo radiativo em ondas longas assim como o balanço radiativo líquido total dentro das regiões 4, 5 e 6 diferem significativamente daqueles encontrados nas áreas 1, 2 e 3. Foi constatado que o fluxo de ondas longas e o fluxo líquido possui um balanço positivo (i.e aquecimento) dentro das regiões fora da atuação da AMAS, e um balanço negativo (i.e resfriamento) nas regiões fora da área de atuação da AMAS. Quanto ao fluxo de ondas longas, percebeu-se

um aquecimento gradativo de fora para dentro dessa zona de atuação (VIEIRA e SILVA, 2006).

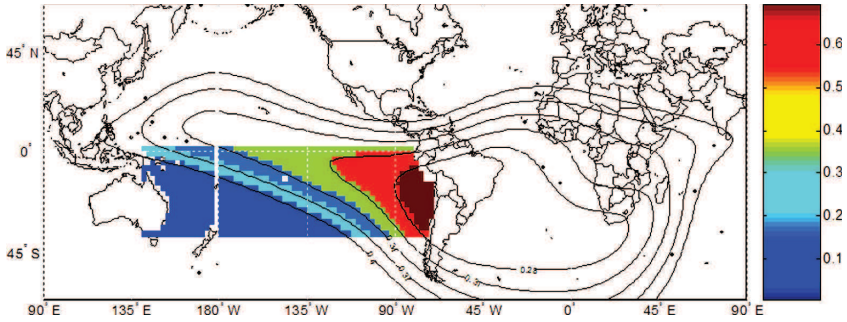


Figura 26 – Mapa de correlação entre o fluxo de Raios Cósmicos e os efeitos anômalos causados pela cobertura de nuvens no equilíbrio radiativo das ondas curtas (VIEIRA e SILVA, 2006)

A através de dados referentes a penetração de RC obtidos a partir da estação de Huancayo/Peru, Vieira e Silva (2006) puderam correlacionar a modulação dos RC na cobertura de nuvens, assim como a sua influência no balanço radiativo da área de estudo. Eles constataram que o saldo radiativo de ondas curtas não segue o comportamento do fluxo de RC, enquanto que, para as ondas longas, o seu comportamento apresenta um elevado índice de coerência, quando dentro da zona de atuação da AMAS, onde observou-se um índice de coerência próximo a $99,9\%$. Pala figura 26 percebe-se que na medida em que a intensidade do campo geomagnético decresce, o nível de coerência entre a penetração de Raios Cósmicos e os efeitos anômalos provocados pela cobertura de nuvens no equilíbrio radiativo das ondas longas cresce (VIEIRA e SILVA, 2006).

3.4.4 Aspectos climáticos da área de estudo

O clima de uma das partes mais importantes dentro região de jurisdição da FIR Curitiba é diretamente influenciado pela ação do sistemas meteorológico ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (DERECZYNSKI e MENEZES, 2017). O ASAS é o responsável por manter as condições atmosféricas sobre a sua área de atuação em equilíbrio termodinâmico (i.e céu claro ou com poucas nuvens, e vento calmo). Durante o verão austral, o cerne do ASAS encontra-se nas coordenadas 32º Sul e 005º Oeste, onde

a pressão é próxima de 1012 hPa. Nesse período, o ASAS encontra-se mais fraco e mais afastado do continente, fazendo com que os centros de baixa pressão ocorra sobre os litorais fluminenses e paulista (DERECZYNSKI e MENESES, 2017).

Durante o inverno do Hemisfério Sul, o cerne do ASAS ocorre na coordenada 27º Sul e 008º Oeste, com uma pressão interna de 1024 hPa. Durante esse tempo, o sistema ASAS penetra na parte sudeste da América do Sul, fazendo com que a pressão sobre a faixa litorânea dessa região brasileira varie entre 1012 e 1020 hPa (DERECZYNSKI e MENEZES, 2017). A ASAS corresponde ao ramo descendente da Célula de Hadley, e estando mais próxima ao continente, ela inibe condições de mau tempo (CARPANEDO e AMBRIZZI, 2020; DERECZYNSKI e MENEZES, 2017).

Contudo, tais condições de estabilidade atmosférica trazida pela ASAS são frequentemente interrompidas pela ação de fenômenos meteorológicos transientes, como sistemas frontais, ciclones extratropicais, vórtice ciclônico subtropical da alta atmosfera, sistemas convectivos em mesoescala, entre outros. Tais sistemas são capazes de produzir condições de elevada cobertura de nuvens, ventos fortes e precipitações intensas. Um outro sistema, que normalmente ocorre entre os meses de Novembro e Março, é a ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul (DERECZYNSKI e MENEZES, 2017).

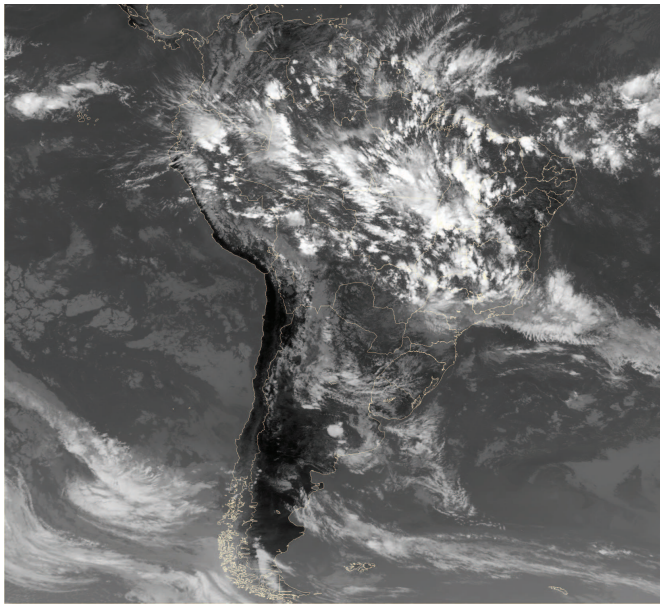


Figura 27 – Imagem do satélite GOES - 12 no dia 11 de Março de 2011 às 18 horas UTC, durante uma ocorrência de ZCAS

A ZCAS consiste em uma faixa orientada na direção noroeste - sudeste, a qual cobre desde os estado da região Norte até o litoral de São Paulo e Rio de Janeiro (DERECZYNSKI, OLIVEIRA e MACHADO, 2009). Tal sistema ocorre normalmente nos meses da primavera, verão e início de outono. Por imagem de satélite, a ZCAS pode ser identificada como uma faixa de nebulosidade, a qual corta o Brasil em diagonal. Essa

região se caracteriza por intensas atividades convectivas, e consequentemente, pela presença de nuvens cumuliformes (SATYAMURTY, NOBRE e DIAS, 1998; MOURA, MARTINS e ASSIREU, 2018).

Quanto aos sistemas frontais, Satyamurty, Nobre e Dias (1998) afirmam que os mesmos estão relacionados à passagens de centros de baixa pressão os quais se deslocam da América do Sul meridional em direção ao norte. Na medida em que os sistemas frontais vão atravessando sobre a parte oriental do continente americano, eles desencadeiam atividades convectivas sobre o Brasil, Argentina, Bolívia e Peru oriental. Penetrações de frente frias ocorrem em todas as estações do ano, porém, as atividades convectivas a elas associadas são raras de acontecer durante o inverno austral, principalmente nos meses de Junho e Julho (SATYAMURTY, NOBRE e DIAS, 1998).

As atividades convectivas são as maiores responsáveis pelas chuvas no norte da Argentina, Uruguai, Paraguai, sul do Peru, e regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Elas ocorrem em maior frequência dentro da faixa latitudinal compreendida entre os paralelos 35º e 40º Sul, possuem uma frequência média de nove vezes ao mês, e são pouco frequentes em regiões ao norte da latitude 20º Sul. Sobre o território brasileiro, as frentes tendem a se mover sobre a costa leste, chegando a atingir o sul do estado da Bahia (SATYAMURTY, NOBRE e DIAS, 1998). De acordo com Dereczynski et al (2009) *apud* Seluchhi, Beu e Andrade (2016), 77% das chuvas que ocorrem na cidade do Rio de Janeiro são provocadas por passagens de frentes frias. Além disso, as frentes frias responsáveis pelas chuvas mais intensas ocorrem com mais frequência nos seis meses mais quentes do ano (SELUCHHI, BEU e ANDRADE, 2016).

Durante o inverno, as massas de ar frio, cuja pressão é alta e temperatura é baixa, costumam penetrar no continente seguindo o sentido entre o norte e o nordeste. Essas massas de ar são responsáveis pela ocorrência das geadas, sobretudo nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo e sul de Minas Gerais. Contudo, na medida em que elas atingem latitudes próximas a 20º Sul, elas vão adquirindo as características da zona subtropical e perdem a sua identidade (SATYAMURTY, NOBRE e DIAS, 1998).

Por fim, é comum o sul do Brasil passar pelo desenvolvimento de CCM - Complexos Convectivos de Mesoescalas, especialmente durante entre os de Novembro e Abril. Tais complexos normalmente se iniciam nas primeiras horas do dia, momentos antes do nascer do Sol, possuem uma duração média de um dia, e provavelmente são desencadeados pelas brisas de montanha dentro de um ar instável. Os CCMs se originam no norte da Argentina e no Paraguai, e movem-se para leste, provocando chuvas intensas no Uruguai e no Sudoeste brasileiro (SATYAMURTY, NOBRE e DIAS, 1998).

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo estão expostos os resultados obtidos nesse trabalho através da metodologia anteriormente descrita. A primeira seção desse capítulo mostra os resultados referentes a variação mensal do Número de Manchas Solares e Emissão Solar F10.7 durante os anos de 1954 à 2008. Em seguida, são apresentados os dados referentes ao fluxo de RCG coletados nos CMM de Hermanus (1958 à 2005) e Potchefstroom (1971 à 2001), juntamente com as Análises de Coerência Wavelet entre esses dados e aqueles referentes à atividade solar. Nas demais seções são apresentados os resultados referentes às variáveis atmosféricas Temperatura Superficial Média, Máxima e Mínima, Umidade Relativa do Ar, Cobertura de Nuvens e Precipitação Total, em cada um dos municípios supracitados. Em cada seção são mostradas um panorama geral das variações mensais dessas variáveis, as reconstruções das séries e as Análises de Coerência Wavelet entre esses dados atmosféricos e os dados solares.

4.1 Séries temporais relativas à atividade solar e fluxo de Raios Cósmicos

A figura 28 mostra os dados referentes a variação do Número de Manchas Solares e Emissão Solar em Rádio F10.7, durante os ciclos 19, 20, 21, 22 e 23, ocorridos entre 1954 e 2008. Conforme mostrado por outros autores, a figura mostra o alto nível de coerência entre as séries, comprovando assim que o fluxo solar em rádio $\lambda = 10,7cm$ pode ser utilizado como uma medida indireta do nível de atividade solar. Percebe-se pelas figuras que cada ciclo solar possui um perfil próprio, diferenciando-se dos demais. Ambas as medidas apontam que o ciclo solar 19 foi o mais intenso de toda a série, pois tanto o Número de Manchas Solares como o fluxo solar F10,7 atingiram o seu valor máximo entre os anos de 1955 e 1960. Em contrapartida, o ciclo seguinte, número 20, foi o menos intenso, onde o Número Máximo de Manchas Solares foi de aproximadamente 100, próximo ao ano de 1970. Os três ciclos solares seguintes mostraram um grau de intensidade mais intermediário, conforme pode ser visto na figura.

A figura 29 mostra o Número de Manchas Solares e a contagens de partículas de Raios Cósmicos feita na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Hermanus/África do Sul, entre os anos de 1958 e 2005, onde é possível perceber a correlação negativa entre as duas medidas. O valor máximo registrado foi de aproximadamente 4600, durante o

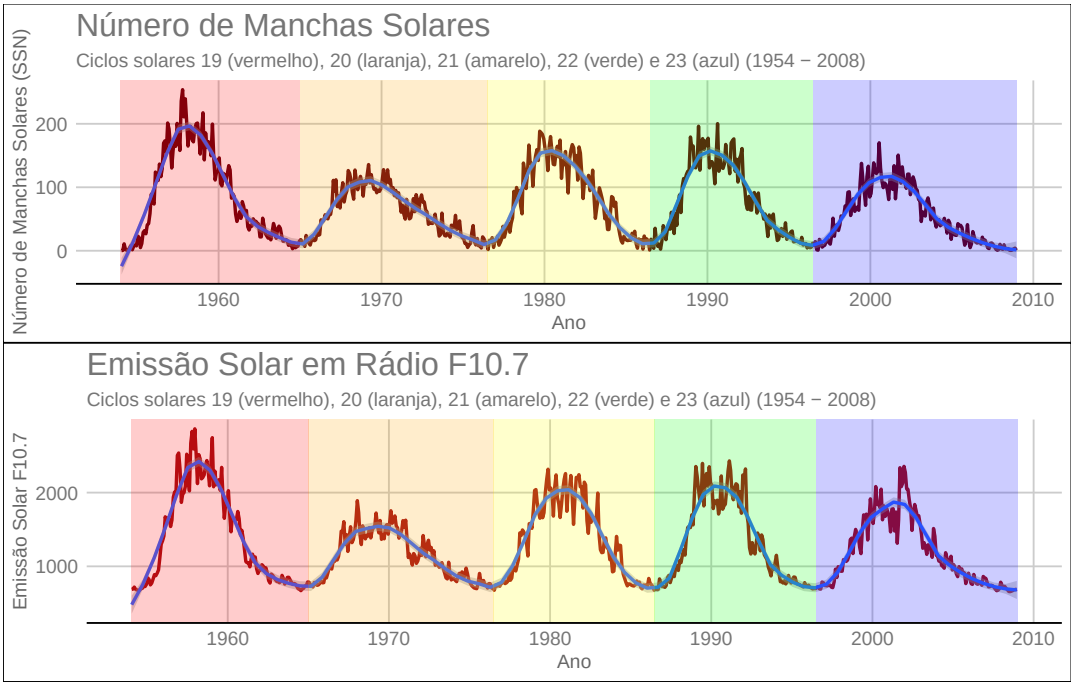


Figura 28 – Número de Manchas Solares e Emissão Solar em Rádio F10.7 para os ciclos solares 19 - 23 (1954 - 2008) (Fonte: O autor)

mínimo solar de 1965, e o segundo valor mais elevado foi de aproximadamente 4500 durante o mínimo solar de 1988. Pelo gráfico, percebe-se que durante as transições dos ciclos solares ímpares para os pares, a curva de Raios Cósmicos apresente um perfil mais agudo, semelhante a um pico, como por exemplo, as transições entre os ciclos 19/20 e 21/22. Já nas transições dos ciclos pares para os ímpares, a curva de Raios Cósmicos apresenta um perfil mais achatado, semelhante a um platô.

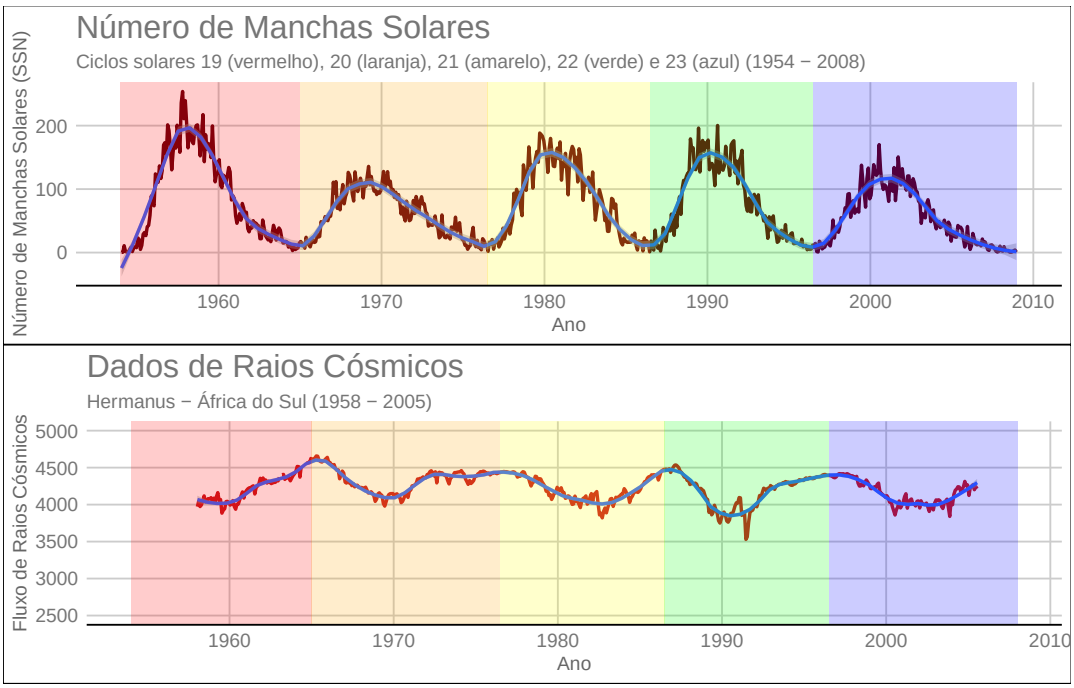


Figura 29 – Número de Manchas Solares e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Hermanus/África do Sul para os anos de 1958 à 2005 (Fonte: O autor)

A figura 30 mostra a Transformada Cruzada de Wavelet para as séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares (Emissão Solar F10.7) e fluxo de Raios Cósmicos na parte superior (inferior). Ambos os painéis mostram níveis de coerência espectral próximos a 1 entre as séries, para escalas de períodos próximas a 128 meses (i.e 10,6 anos), entre os 150º e 450º meses dessas séries. Dentro dessa faixa espectral, as setas voltadas para o hemisfério esquerdo indicam que a diferença angular de fase encontra-se entre o segundo e terceiro quadrante do círculo trigonométrico, ou seja, próximo a π radianos. Além disso, a série temporal relativa a Emissão Solar F10.7 apresentou nível de coerência com o fluxo de Raios Cósmicos para o espectro próximo a $f^{-1} = 256$ logo após o 300º mês, com um ângulo de fase situado no segundo quadrante.

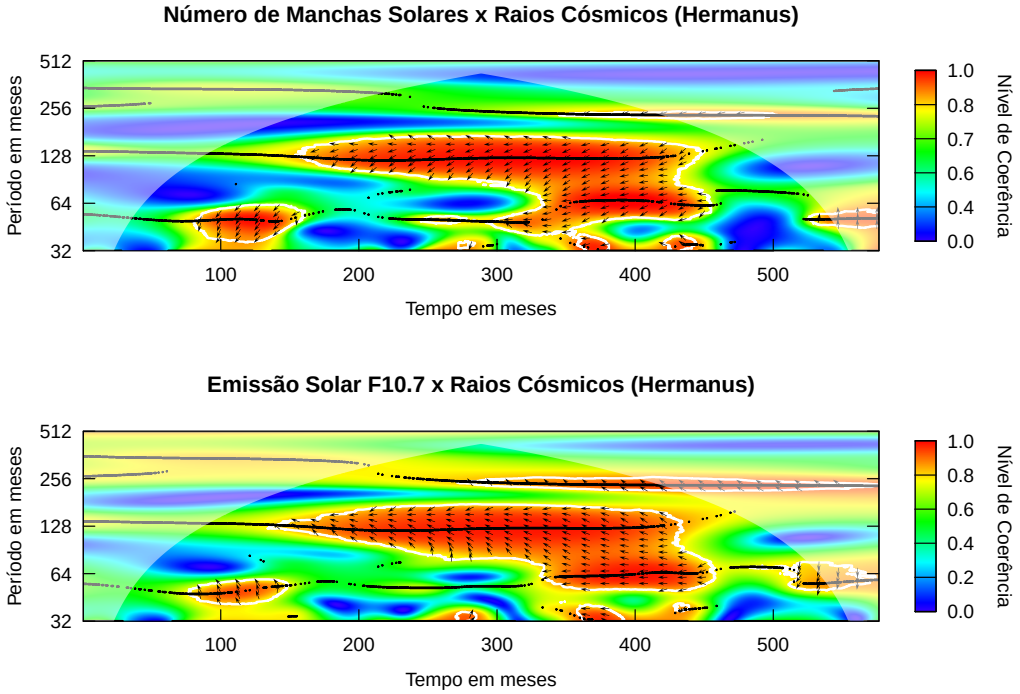


Figura 30 – Transformadas Cruzada de Wavelet para as séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares (painel superior)/Emissão Solar F10.7 (painel inferior) e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Hermanus (Fonte: o Autor).

A figura 31 mostra a contagem de Raios Cósmicos registrada na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Potchefstroom/África do Sul, entre os anos de 1971 e 2001. Semelhantemente ao observado em Hermanus, percebe-se que o máximo de Raios Cósmicos durante a transição do ciclo 21 para o 22 possuí um perfil mais agudo quando comparado aos demais. Nessa estação, o máximo de partículas ocorreu durante o mínimo solar de 1986 1987, onde a contagem de partículas foi de aproximadamente 2225.

A figura 32 mostra as Transformadas Cruzada de Wavelet entre os índices de atividade solar e o fluxo de Raios Cósmicos registrado em Potchefstroom, entre os anos de 1971 e 2001. Para períodos situados no espectro próximo a $T = f^{-1} = 128$ meses,

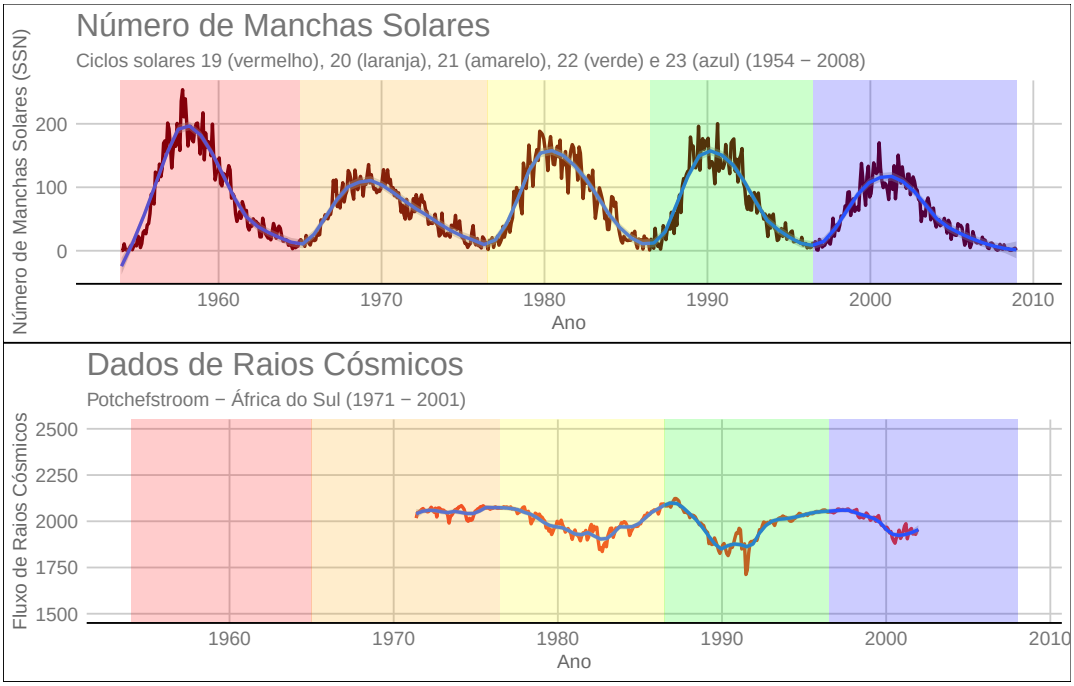


Figura 31 – Número de Manchas Solares e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Potchefstroom/África do Sul para os anos de 1971 à 2001 (Fonte: O autor)

observa-se um nível de coerência de aproximadamente 0,8 após o quinquagésimo mês, na relação Números de Manchas Solares/Raios Cósmicos. Além disso, nota-se que esse nível de coerência aumenta de forma progressiva, atingindo valores mais próximos a 1 após o 200º mês. Na relação Emissão Solar/Raios Cósmicos, comportamento semelhante pode ser observado, contudo, somente após o 75º mês. Em ambos os casos, as setas voltadas majoritariamente para a esquerda indicam um ângulo de fase próximo a π radianos. Índices de coerência espectral próximos a 1 também são observados para escalas de períodos de 64 meses (i.e 5,3 meses) entre os meses 200 e 300.

4.2 Temperatura Superficial Média

4.2.1 Campo Grande

Os dados relativos à temperatura superficial média em Campo Grande, mostrados na figura 33, mostram um perfil bastante heterogêneo ao longo de todo o período de estudo, fazendo com que a amplitude térmica anual seja bastante variável. As temperaturas mais elevadas dessa série ocorreram durante a fase de declínio do ciclo solar 19 e início do ciclo 20. Durante quase todo o tempo de estudo, os valores máximos anuais mantiveram-se próximos a 300 Kelvins. Quanto aos valores mínimos sazonais, percebe-se que os mesmos também seguiram um perfil variável ao longo do tempo, contudo, sempre estiveram próximos a 292 Kelvins. O valor mais baixo dessa série foi registrado na fase de máximo do ciclo solar 19.

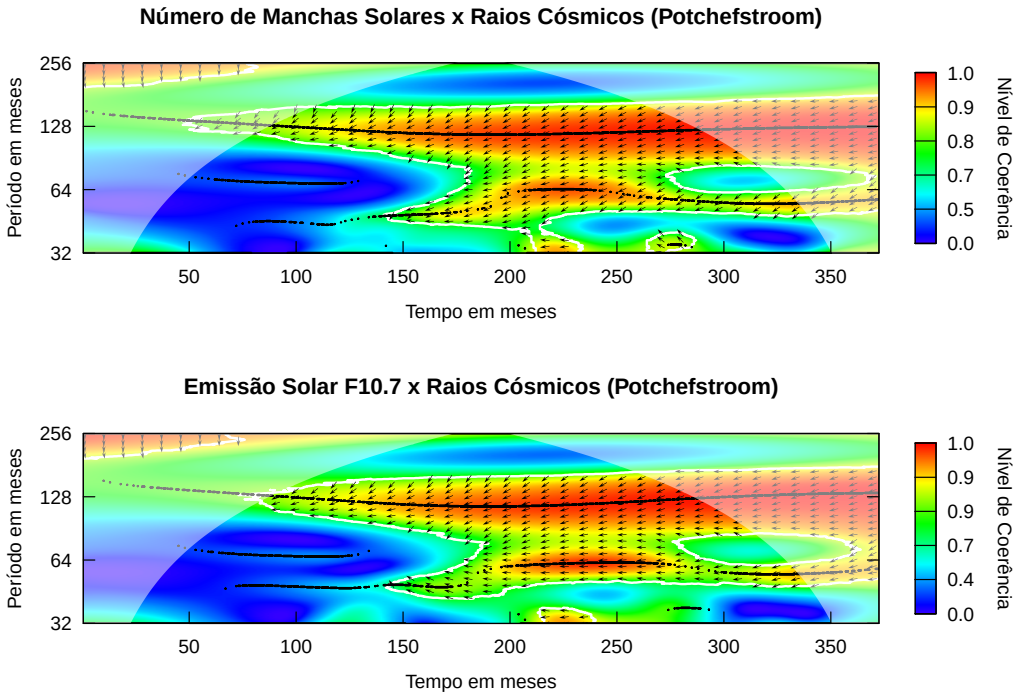


Figura 32 – Transformadas Cruzada de Wavelet para as séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares (painel superior)/Emissão Solar F10.7 (painel inferior) e fluxo de Raios Cósmicos observado na Estação de Monitoramento de Nêutrons de Potchefstroom (Fonte: o Autor).

A curva azul denota a média suavizada dessa série, a qual oscilou levemente em torno de 296 Kelvins. Durante os ciclos 22 e 23, percebe-se que essa curva passa a variar com uma frequência mais baixa, contudo, próximo ao valor anteriormente citado.

A figura 34 mostra a variação da temperatura superficial média observada em

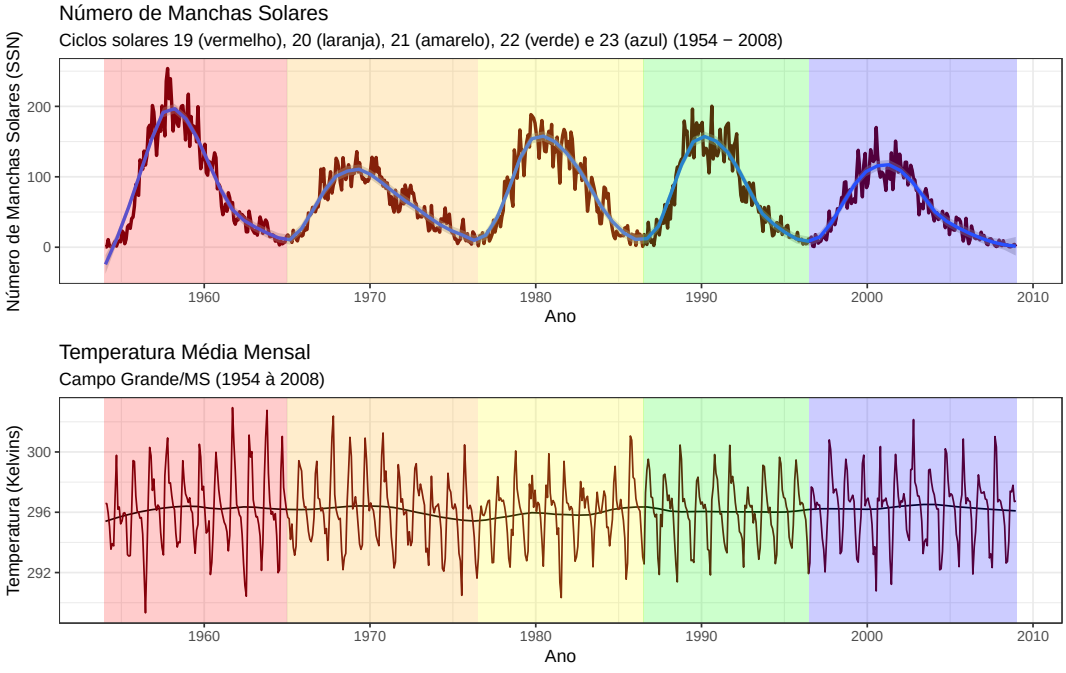


Figura 33 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Campo Grande/MS

Campo Grande/MS (painel inferior), o Número Mensal de Manchas Solares (painel superior), assim como as suas respectivas reconstruções para uma periodicidade de 64 meses (i.e aproximadamente meio ciclo solar). Para reconstruir a série mostrada no painel superior, foi utilizado um nível de significância igual a 0,5. enquanto que aquela mostrada na parte inferior, um igual a 0,9965. Analisando as amplitudes variacionais, nota-se que as maiores delas aconteceram durante o ciclo solar 19, cujo máximo de manchas indica atividades solares mais intensas do que nos demais ciclos. Também é possível observar grandes amplitudes durante o ciclo solar 21. As amplitudes mais baixas ocorreram no ciclo solar 20, o qual foi o menos intenso de todos. Comparando ambos os gráficos, percebe-se que as duas reconstruções encontram-se aparentemente em fase, ou seja, com máximos e mínimos coincidentes.

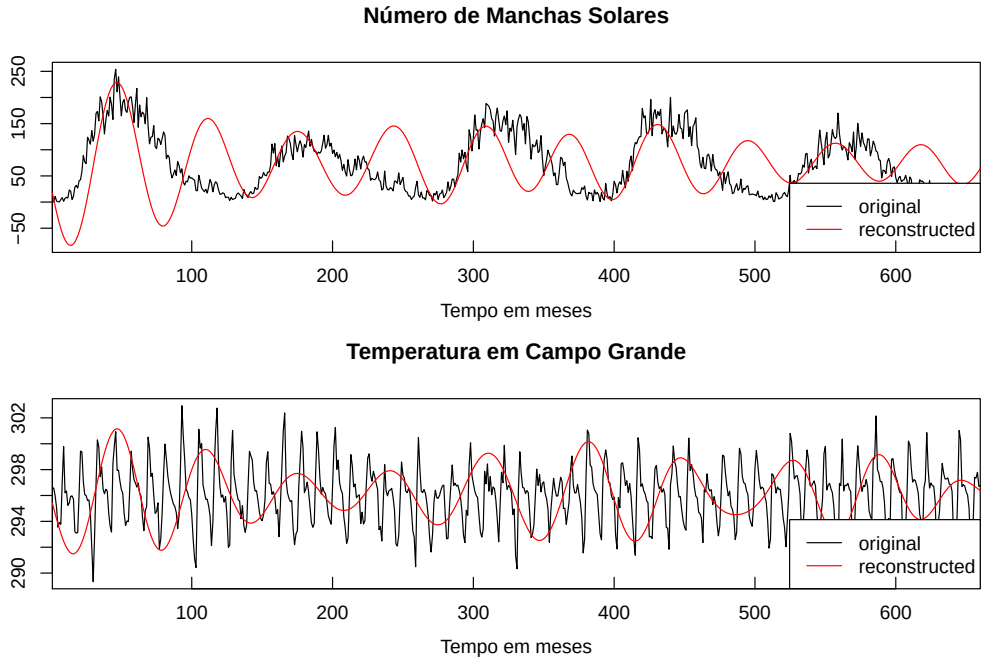


Figura 34 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a periodicidade de 128 meses, a reconstrução dessa série temporal relativa a temperatura média mostra uma descontinuidade entre o mês 350 e 400, ou seja, durante a fase de declínio do ciclo 21, conforme exposto na parte inferior da figura 35. As maiores amplitudes variacionais puderam ser observadas no ciclo solar 19 e 20. Nos demais ciclos, observa-se uma amplitude significativamente mais baixa. Entre o primeiro e o 350º mês, as duas séries estão aproximadamente em fase, enquanto que após o 400º elas se mostram em uma aparente oposição de fase.

Na figura 36 é mostrada a reconstrução dessas duas séries temporais para a periodicidade de 22 anos (aproximadamente 256 meses). Conforme mostrado no gráfico

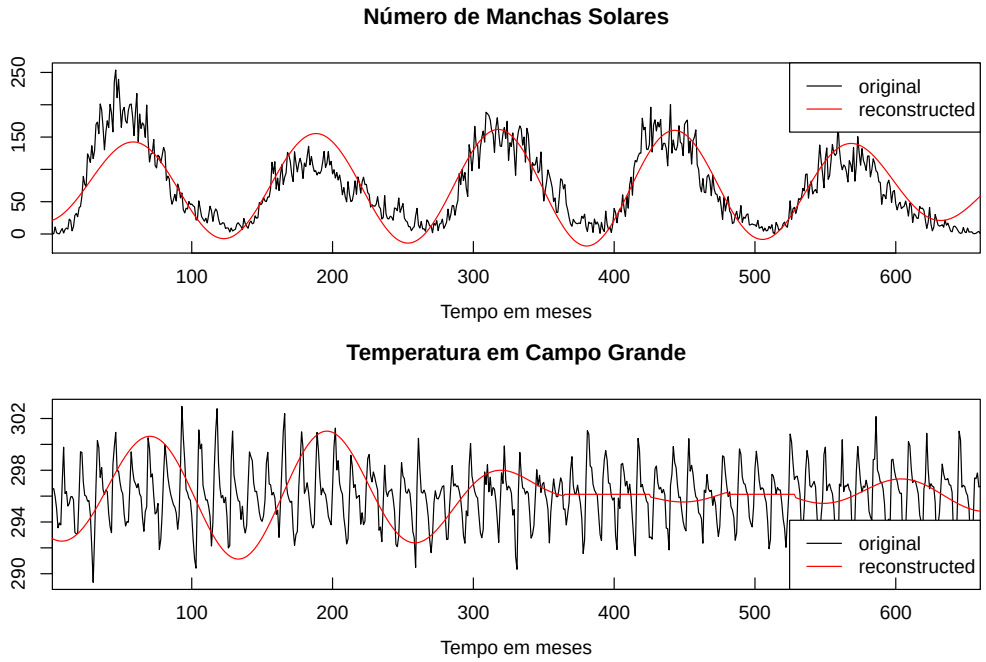


Figura 35 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

inferior, a amplitude variacional manteve-se relativamente constante ao longo do tempo, havendo somente uma pequena diminuição nos ciclos 22 e 23. Para esse período, as duas reconstruções apresentam uma defasagem próxima a 90º.

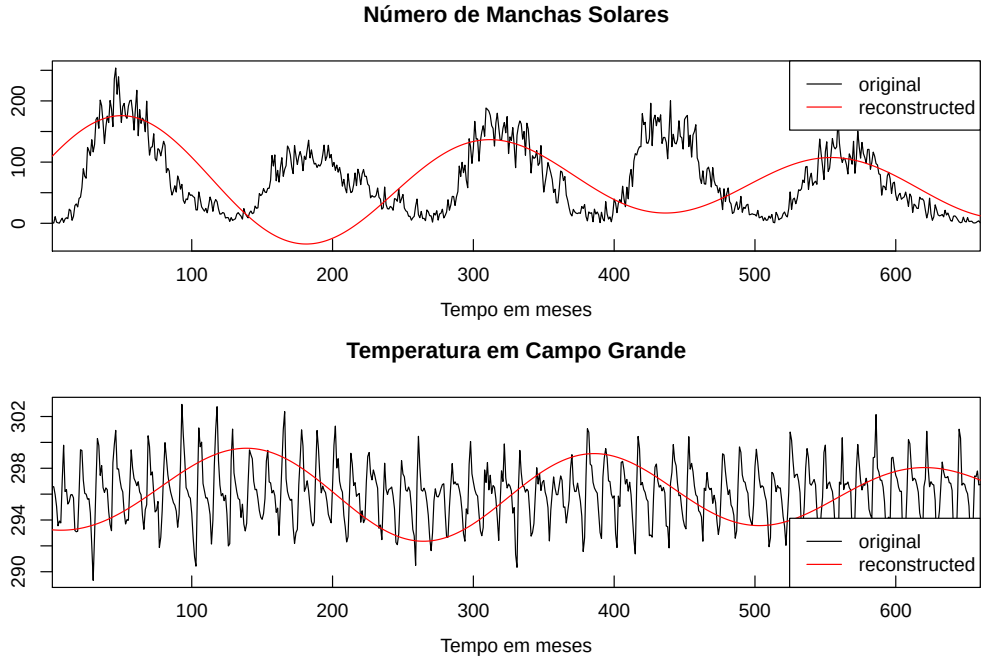


Figura 36 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

A figura 37 mostram as Análises de Coerência Wavelet entre as séries temporais

relativas ao Número de Manchas Solares/Emissão Solar F10.7 e temperatura superficial média em Campo Grande/MS. Em ambos os casos, observa-se um elevado grau de coerência para a faixa espectral entre 256 e 512 meses durante todo o período. Nessa região, a predominância de setas voltadas para cima indicam um ângulo de fase entre as séries próximo a 90º, conforme sugere os gráficos da figura 36.

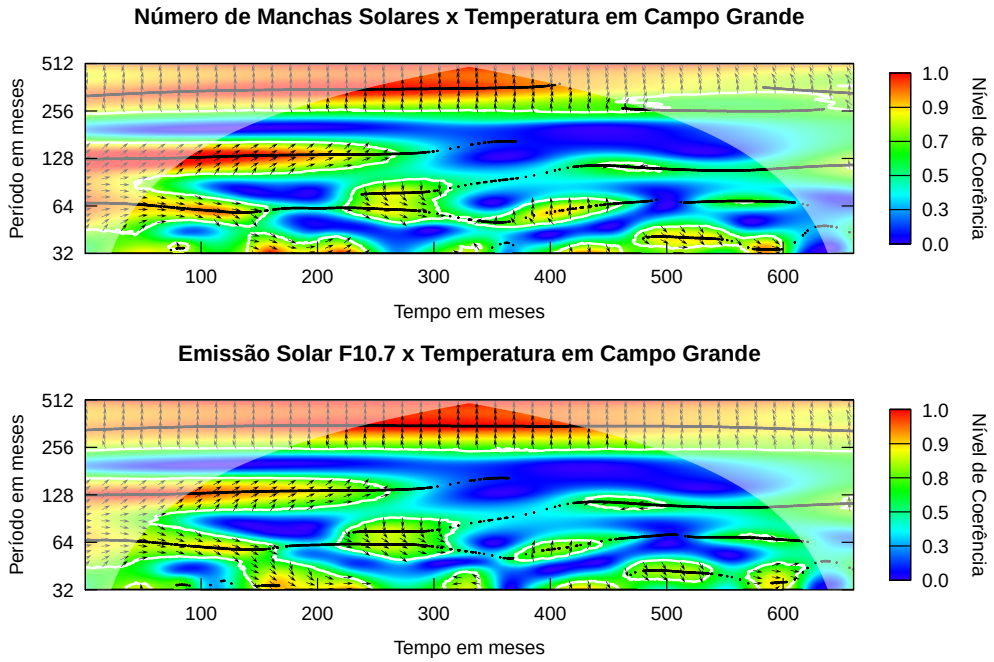


Figura 37 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

Para a faixa espectral próxima a 128 meses, observa-se que índices de coerência superior a 0,8 ocorreram entre o primeiro e o 350º mês, com uma diferença angular de fase próxima à 45º. Já para períodos de meio ciclo solar, nota-se a presença de algumas regiões mais isoladas com alto grau de coerência. Comparando ambos os gráficos, percebe-se que a relação Número de Manchas Solares/Temperatura mostra-se mais intensa, dentro da periodicidade de 64 meses, do que aquela observada entre Emissão Solar F10.7/Temperatura.

4.2.2 Curitiba

Na figura 38 tem-se o gráfico da série temporal relativa a Temperatura Superficial Média em Curitiba durante os anos desse estudo. A média suavizada apresenta um comportamento mais variável do que aquele observado em Campo Grande. Durante o ciclo solar 19, nota-se que esse média sofreu uma oscilação significativa, fazendo com que ela atingisse pontos de máximo e mínimo nesse ciclo. Nos ciclos 20, 21 e 22, a curva suavizada manteve-se aproximadamente constante, oscilando levemente em torno de 292 Kelvins.

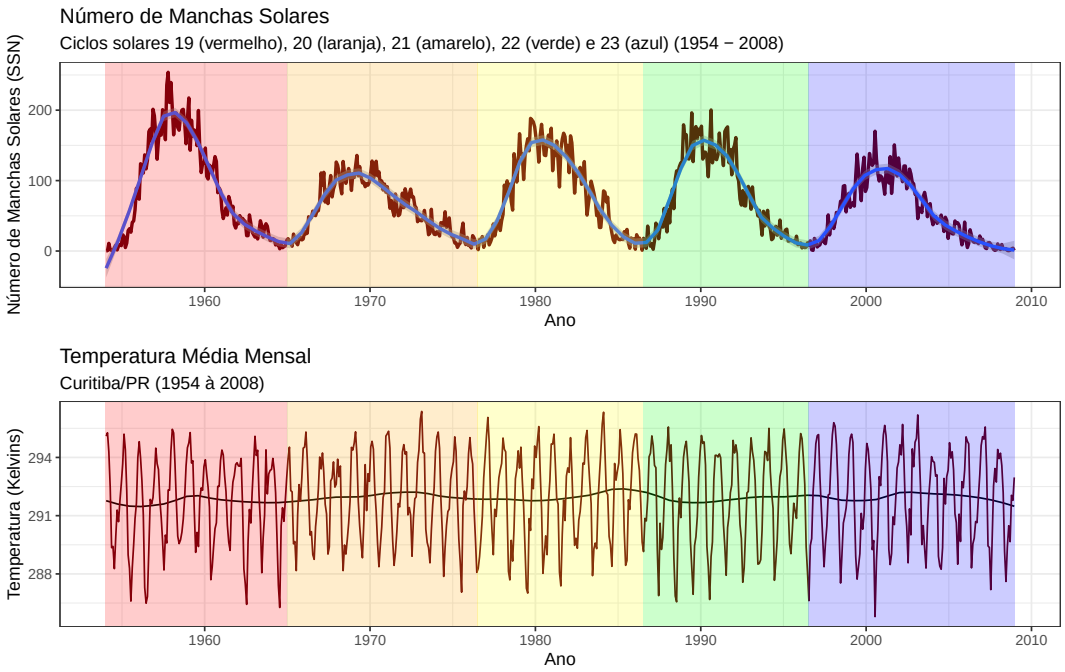


Figura 38 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Curitiba/PR

No ciclo solar 23, percebe-se que essa curva torna a ter uma variação mais evidente. Os máximos anuais dessa série mantiveram-se, majoritariamente, acima de 294 Kelvins, e sofrendo poucas variações ao longo do tempo. Já os mínimos sazonais, percebe-se um perfil mais heterogêneo, pois, nota-se a presença de ponto abaixo de 288 Kelvins, seguidos de outros acima desse valor. O valor máximo dessa série ocorreu na segunda metade do ciclo 20, enquanto que o mínimo, no pico do ciclo solar 23.

A figura 39 mostra as decomposições das séries da figura 38 para uma periodicidade de 64 meses. Comparando ambas as reconstruções, percebe-se um elevado grau de coerência entre as séries durante o ciclo solar 19, uma vez que ambas reconstituições apresentam uma elevada amplitude variacional. Comportamento aproximadamente semelhante também é notável nos ciclos solares 20, 21 e 22, onde ambas as séries demonstram uma amplitude baixa ao longo do tempo. No ciclo 23, percebe-se uma elevada amplitude variacional na série relativa à temperatura média, enquanto que para aquela relacionada ao Número de Manchas, nota-se uma mais baixa. A reconstituição mostrada no painel inferior apresenta um comportamento contínuo e diferenciável por partes, uma vez que observa-se uma descontinuidade entre o mês 300 e 350, mostrado pela seção reta horizontal. Por fim, é possível observar visualmente que ambas as reconstruções estão aproximadamente em fase durante todo o tempo.

Para a escala de período de 128, a figura 40 sugere um grau de coerência espectral entre as séries elevado, pois, percebe-se que ambas as reconstruções apresentam elevadas amplitudes variacionais ao longo de todo o tempo. Quanto a diferença de fase, as reconstituições sugerem que durante o ciclo 19 e 20, as duas séries estão com uma

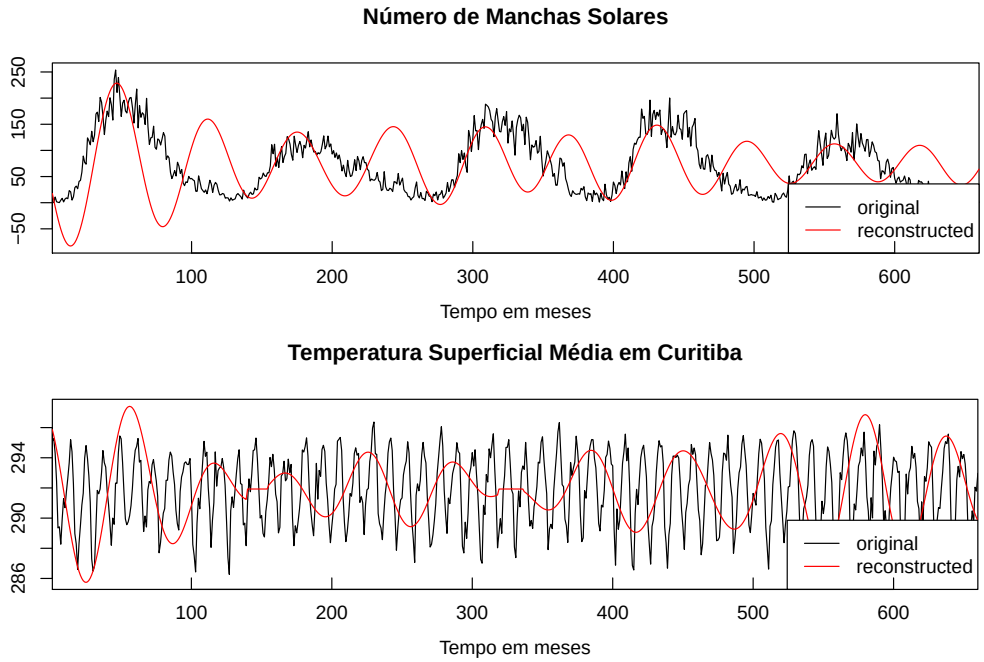


Figura 39 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

defasagem de aproximadamente 90º. A partir do ciclo solar 21, já se nota uma oposição de fase entre as duas ondas. Por fim, diferentemente do mostrado na figura 39, percebe-se que ambas as reconstruções apresentam um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio.

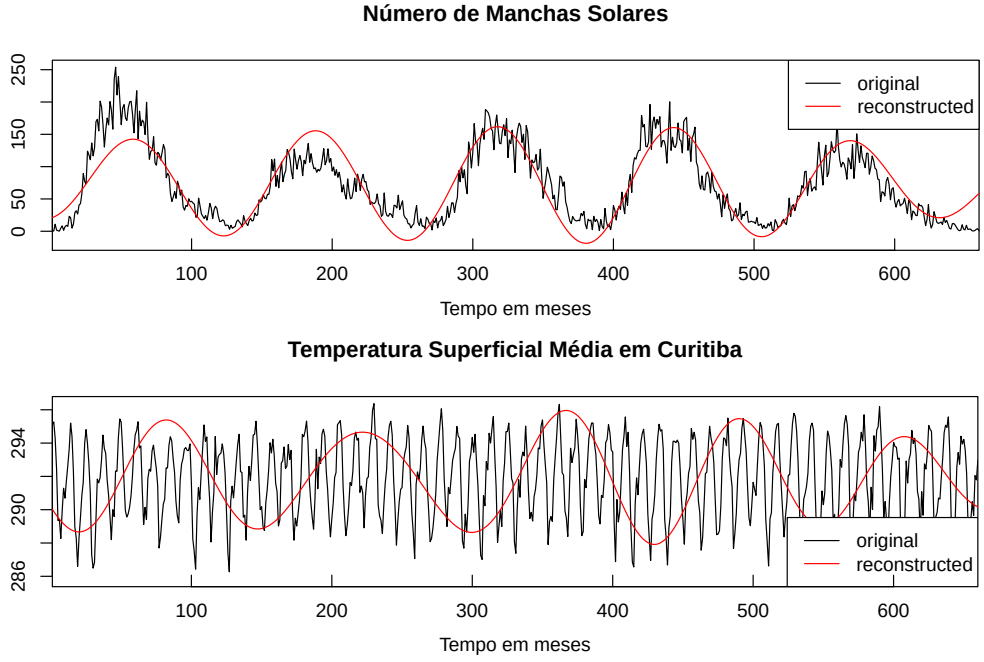


Figura 40 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Para o período espectral de 256 meses, a figura 41, também é possível observar um grau de coerência significativo entre as duas reconstituições e uma oposição de fase entre as séries, ao longo de todo os 660 meses. Semelhante ao mostrado na figura 40, as duas reconstruções mostram um comportamento contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio.

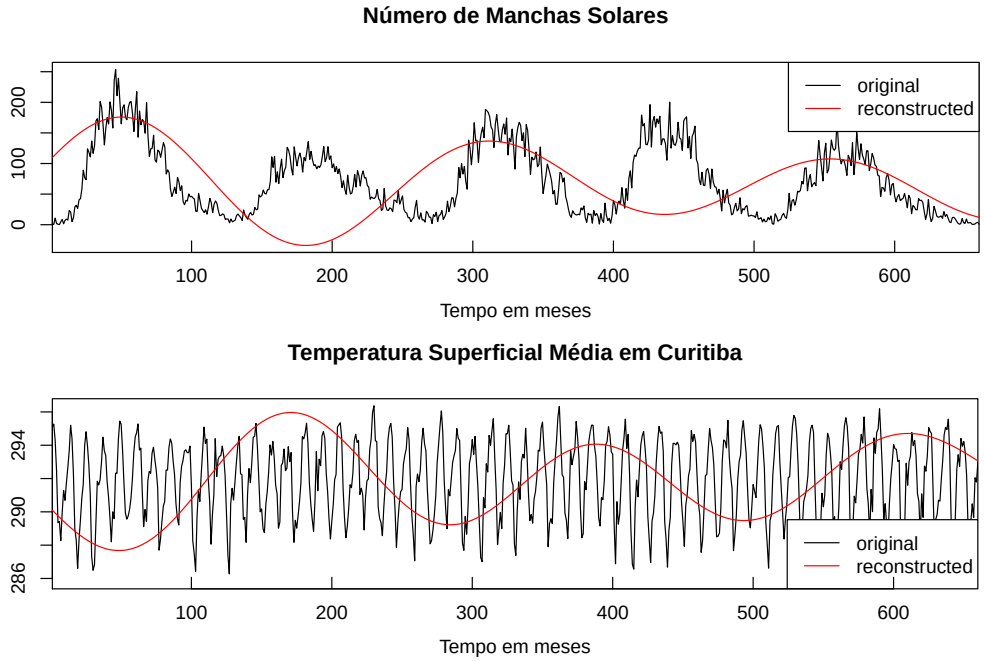


Figura 41 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Por fim, na figura 42 é mostrada as Análises de Coerência Wavelet entre a série temporal relativa à temperatura superficial média em Curitiba e (i) Número de Manchas Solar (painel superior); (ii) Emissão Solar F10.7 (painel inferior). Para a escala espectral de períodos entre 512 e 256 meses, percebe-se um grau de coerência superior a 0,8 entre o primeiro e o 550º mês, sendo que, no caso (ii) percebe-se uma maior predominância de regiões onde o nível de coerência espectral é mais próximo a 1. Vale ressaltar que toda essa região encontra-se fora do cone de influência, e portanto, os efeitos de borda devem ser levados em consideração.

Para a escala de 256 meses, a presença dominante de setas voltadas para o lado esquerdo indica que o ângulo de fase entre as séries é de 180º, confirmando assim o que sugere a figura 41. Para a escala de período próximo a 11 anos, observa-se níveis de coerência espectral maior que 0,8 ao longo dos 660 meses da série, havendo alguns intervalos onde é possível observar níveis próximos a 1, inclusive, tais como entre o mês 1 e 200, e entre o 350 e 550. Quanto ao ângulo de fase, as setas indicam que entre o mês 1 e o 350, o seu valor foi próximo a 90º. Após o 350º mês, nota-se que o ângulo de fase passa

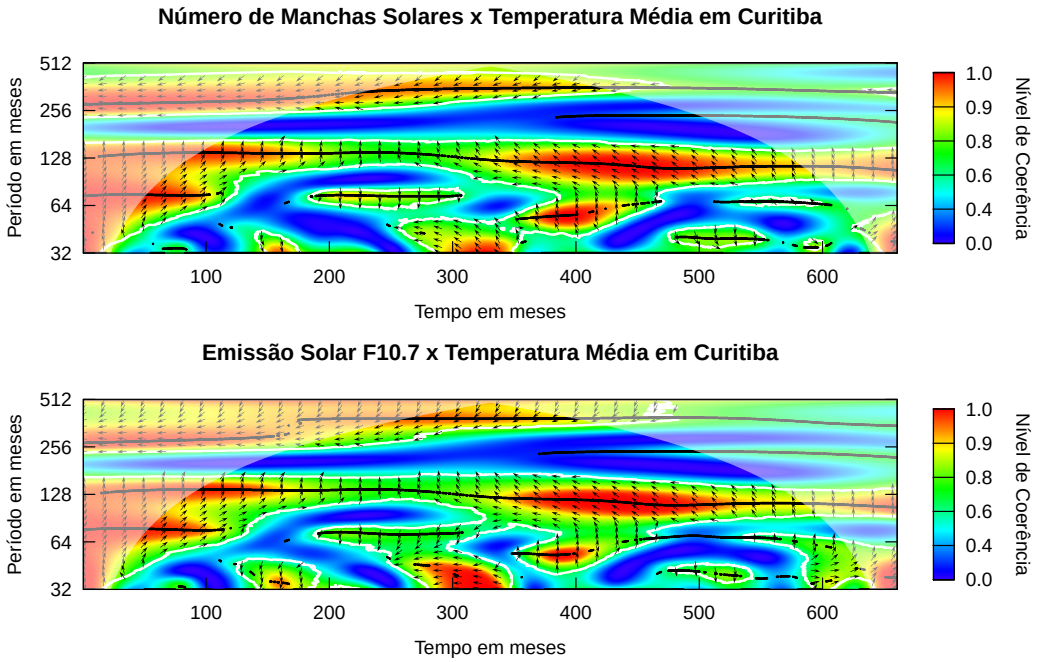


Figura 42 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

a assumir valores mais próximos a 180º.

4.2.3 Porto Alegre

A figura 43 mostra a variação da Temperatura Superficial Média na cidade de Porto Alegre/RS, durante o tempo de estudo. Semelhante ao observado em Curitiba, percebe-se uma variação significativa na curva suavizada durante o ciclo solar 19, onde ela sofre uma diminuição e aumento. Outras variações podem também ser vistas durante a transição do ciclo solar 21 para o 22 e no curso do ciclo solar 23. Nos demais períodos, percebe-se um comportamento mais contante e próximo a 292 Kelvins. Os máximos sazonais mantiveram-se em um perfil pouco variável e um pouco acima de 294 Kelvins. Quanto aos mínimos, percebe-se um perfil mais heterogêneo, havendo anos com invernos mais rigorosos, seguidos de anos de invernos mais amenos. O valor máximo dessa série foi observado na fase de declínio do ciclo 21, enquanto que o valor mínimo, no pico do ciclo solar 19.

Diferentemente dos resultados coletado em Campo Grande e Curitiba, para a série temporal relativa à temperatura superficial média só foi possível fazer a reconstrução para a escala de períodos de 64 e 128 meses. Ambas as reconstruções possuem um perfil contínuo e diferenciável por partes, conforme mostrado nas figuras 44 e 45. Para o período de 64 meses, ocorre uma descontinuidade durante a fase de crescimento do ciclo solar 21, a qual é denotada pela seção horizontal da curva vermelha. Essa reconstituição apresenta

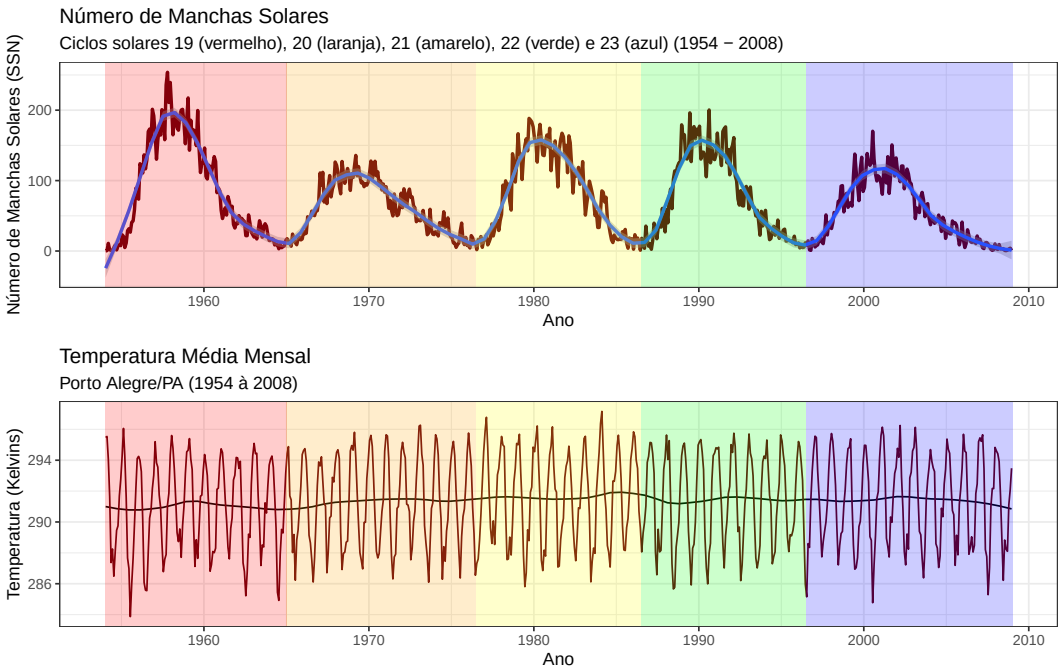


Figura 43 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Porto Alegre/RS

grandes amplitudes variacionais durante o ciclo solar 19, 22 e 23. Nos ciclos 20 e 21, observa-se uma baixa extensão variacional na reconstituição. O mesmo ocorre para o Número de Manchas Solares, durante esse ciclo. Quanto a diferença de fase, a imagem sugere que tal valor esteve próximo a 0º até o mês 250, passando então a assumir valores mais próximos a 180º posteriormente.

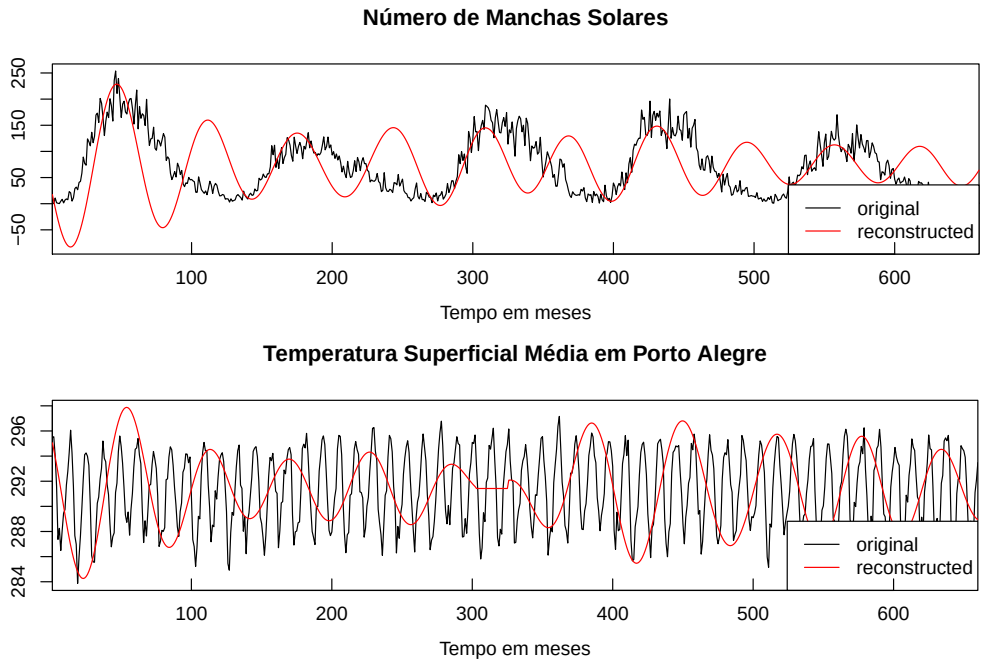


Figura 44 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a escala de período de 128 meses, conforme exposto na figura 45, é observada uma descontinuidade na reconstrução da série entre os meses 290 e 300. Quanto a amplitude variacional, observa-se que o maior valor observado ocorreu durante o ciclo solar 19. Nos demais ciclos, essa extensão manteve-se entre 290 e 294 Kelvins, aproximadamente. Antes da descontinuidade, durante os ciclos solares 19 e 20, nota-se que as duas reconstruções encontram-se aproximadamente em fase. Posteriormente, observa-se uma oposição de fase entre as duas ondas.

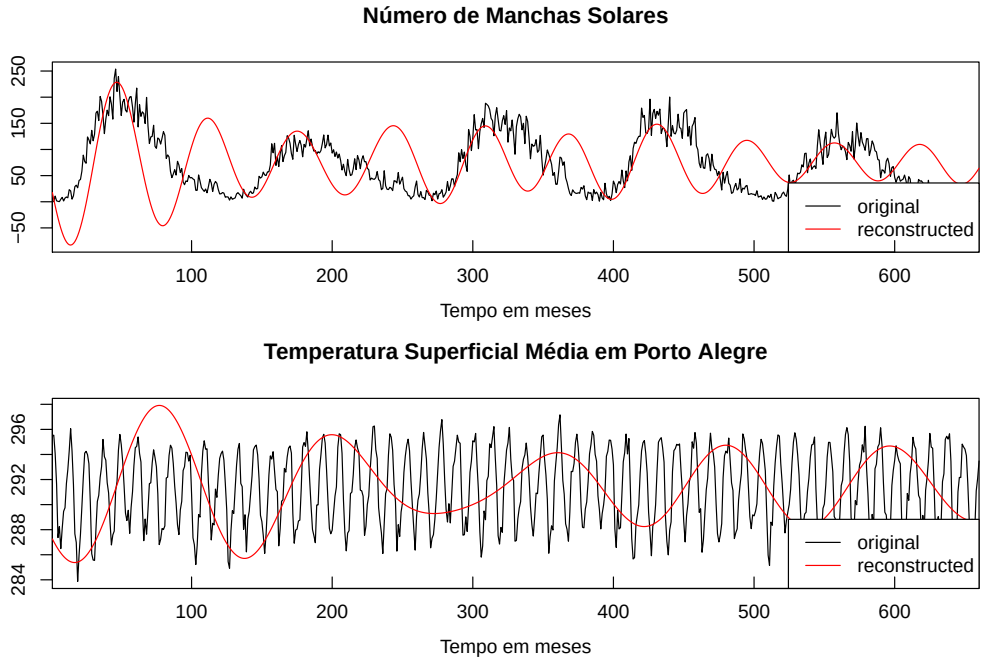


Figura 45 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Por fim, na figura 46 mostra-se as Análises de Coerência Wavelet entre os índices de atividade solar e a temperatura superficial média em Porto Alegre. Para as periodicidades próximas de 128 meses, observa-se que o grau de coerência espectral entre a Emissão Solar F10.7 e a temperatura manteve acima de 0,7 durante todo o tempo de estudo, enquanto que para o Número de Manchas Solares, observa-se uma descontinuidade nessa mesma região durante o ciclo 21.

Quanto ao ângulo de fase entre as séries, para essa escala de período, a presença predominante de setas voltadas para cima indica um valor próximo a 90º durante todo os 660 meses das séries. Para o espectro de períodos entre 256 e 512 meses, observa-se uma região onde o nível de coerência espectral fora superior a 0,8 entre o primeiro e o 400º mês, com diferença angular de fase próxima a 270º. Já para escalas de períodos variando entre 64 e 32 meses, observa-se a presença de algumas regiões isoladas com nível de coerência próximos a 1, com ângulos de fase variáveis.

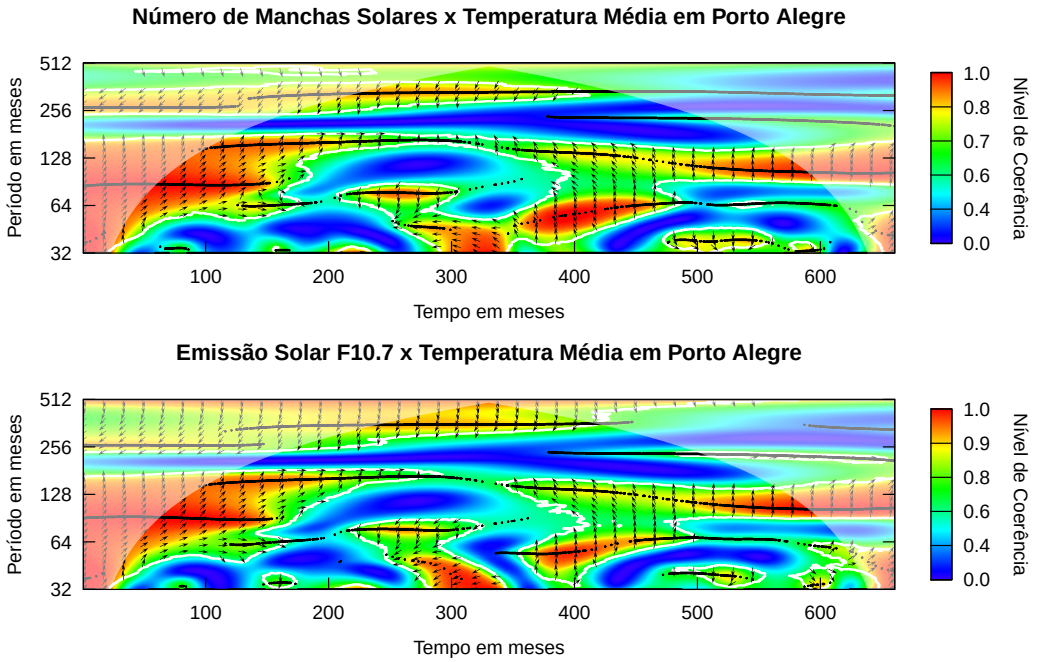


Figura 46 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

4.2.4 Rio de Janeiro

Quanto a temperatura superficial média na cidade do Rio de Janeiro, a figura 47 mostra a média suavizada dessa série apresentou um comportamento bastante variável ao longo de todo o período de estudo. A maior variação nessa curva pode ser vista durante o ciclo 19, onde ela sofre uma diminuição acentuada seguida de um aumento significativo. Ao longo de todo o tempo, essa média manteve-se oscilando entre 295 e 293 Kelvins. Tanto os máximos quanto os mínimos sazonais também seguem um comportamento variável ao longo do tempo, havendo verões/invernos mais rigorosos, seguidos de outros mais fracos. A temperatura máxima dessa série fora de 297 Kelvins e ocorreu na fase de declínio do ciclo solar 19, já a mínima fora próxima de 289 Kelvins, e ocorreu no pico do ciclo solar 19.

Na figura 48 é mostrada as reconstruções das séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares e Temperatura Superficial Média na cidade do Rio de Janeiro, para a escala de período de 64 meses. As maiores extensões variacionais para a temperatura foram detectadas no ciclo solar 19, fase de decrescimento do ciclo 20 e fase de crescimento do ciclo 21, e na fase final do ciclo solar 23. No ciclo solar 22, foi observado uma baixa amplitude variacional. Entre o primeiro e o centésimo mês, observa-se que ambas as reconstituições encontram-se em fase. Posterior ao mês, observa-se que elas estão em oposição de fase.

Para a periodicidade de 128 meses, a figura 49 mostra que ambas as reconstruções possuem um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o domínio $t \in [0, 660]$. No painel inferior da figura, é possível ver que a amplitude da reconstrução mantem-se

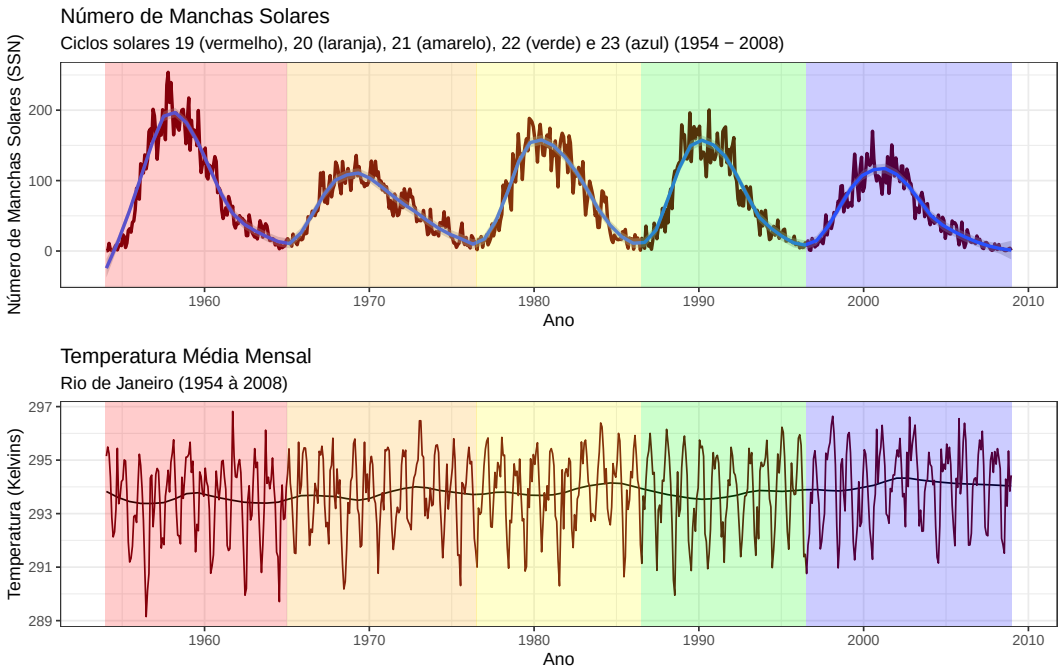


Figura 47 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Média em Rio de Janeiro/RJ

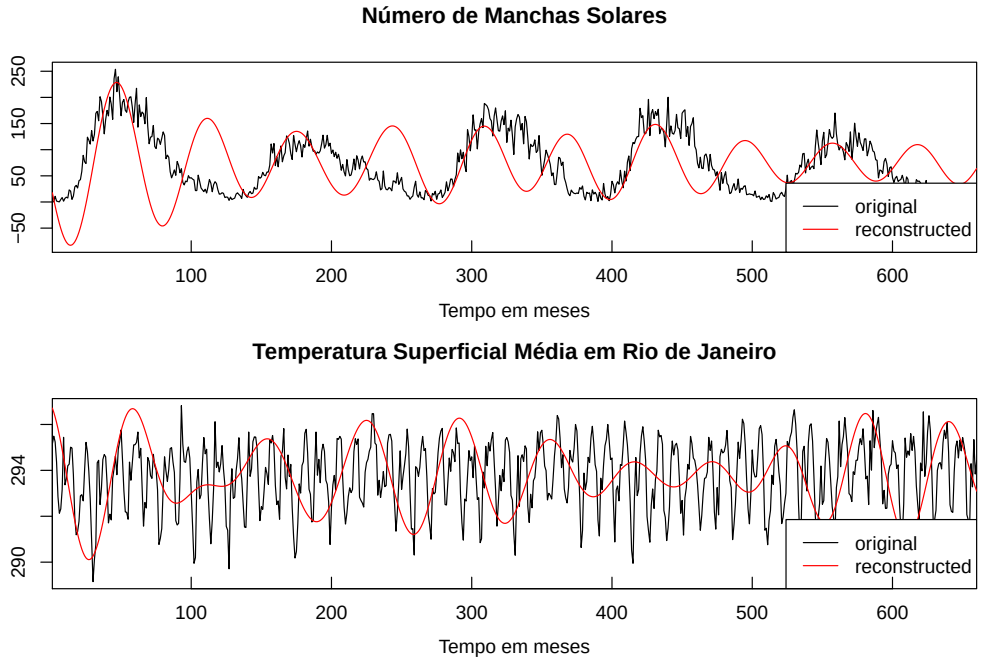


Figura 48 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

aproximadamente constante durante todo o tempo, tendo somente um aumento durante a fase de declínio do ciclo solar 21. Quanto a diferença de fase, é notório que as duas ondas mantiveram-se em uma oposição de fase ao longo de todo o tempo.

Já para a escala de período próxima a 2 ciclos solares, a figura 50 mostra a reconstituição dessa série para essa periodicidade só foi possível após o mês 210. Entre

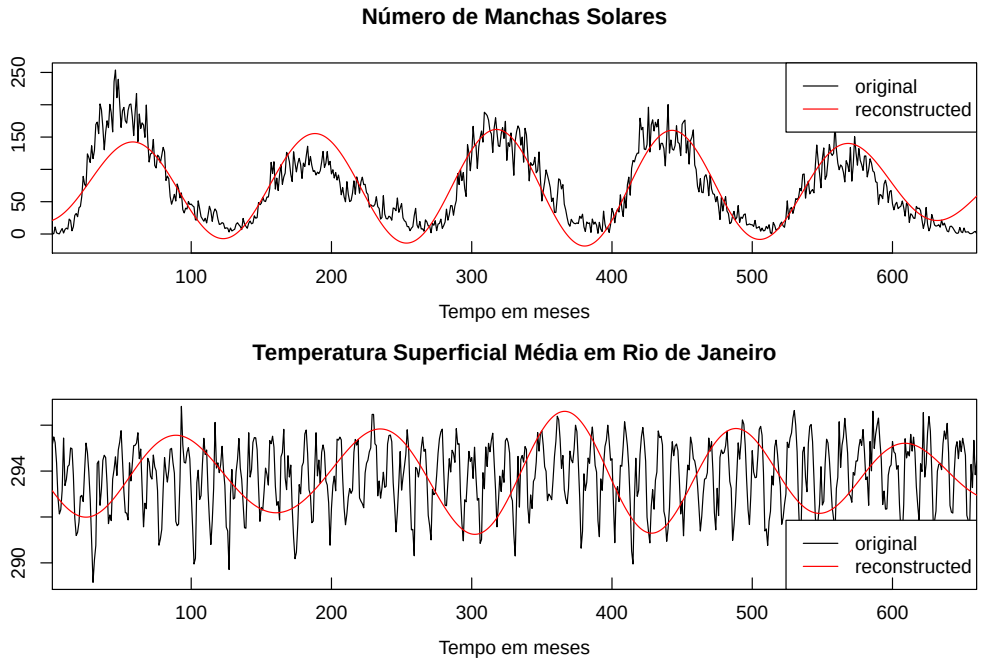


Figura 49 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

o mês 1 e 140, observa-se uma amplitude variacional muito baixa, e entre este último mês e o 210 existe uma região de descontinuidade. Somente após o 210º é que se observa amplitudes mais significativas. Nesse intervalo, percebe-se que as duas reconstituições encontram-se aproximadamente em fase.

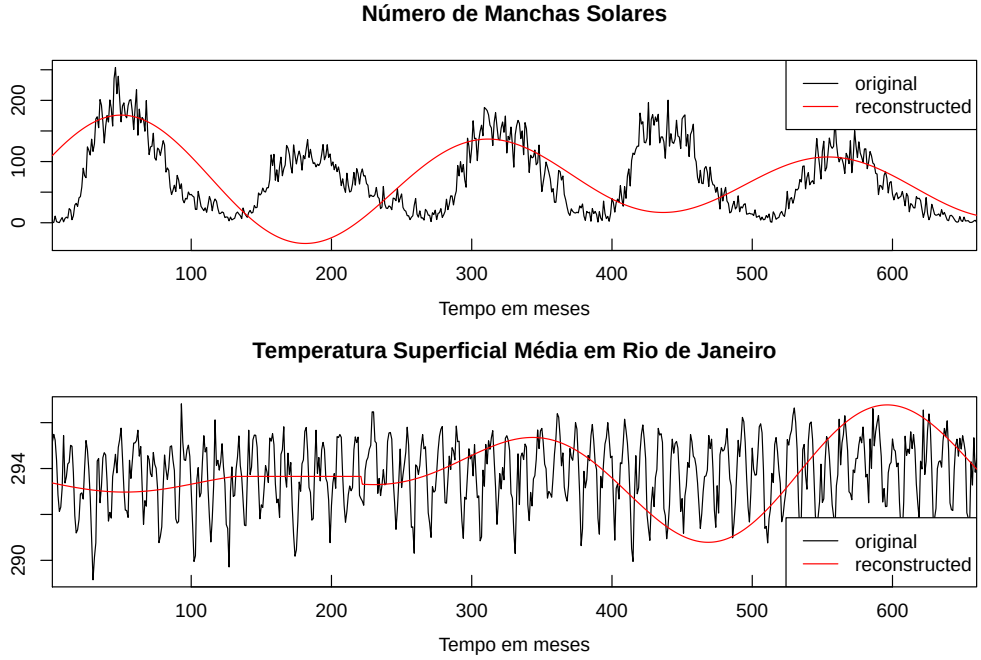


Figura 50 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial média em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Por fim, na figura 51 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média registrada no Rio de Janeiro e os índices de atividade solar. Para a escala de períodos entre 512 e 256 meses, observa-se níveis de coerência maiores que 0,8 durante todo o tempo de estudo, para o Número de Manchas Solares, e entre o primeiro e o 350º mês, para a Emissão Solar F10.7. Quanto ao ângulo de fase, observa-se que o seu valor esteve entre 180º e 270º ao longo do tempo.

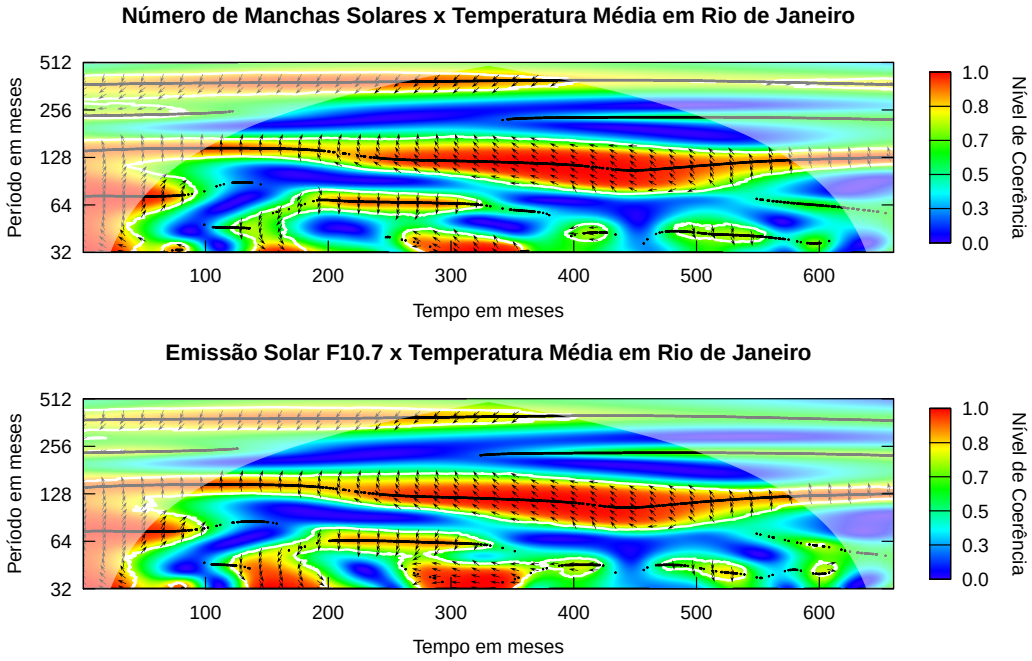


Figura 51 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

Para a escala espectral de período de 128 meses, é notável que o índice de coerência entre as séries esteve acima de 0,8 ao longo de todo o tempo, havendo inclusive, intervalos onde tal valor atingiu níveis próximos a 1. Em relação ao ângulo de fase, observa-se que entre os meses 1 e 300, o seu valor fora próximo a 90º. No restante do tempo, tal valor esteve mais próximo a 180º.

4.3 Temperatura Superficial Máxima

4.3.1 Campo Grande

A figura 52 mostra a temperatura superficial máxima para a cidade de Campo Grande durante os ciclos solares 19, 20, 21, 22 e 23. O valor máximo dessa série foi registrado durante o pico do ciclo solar 20, enquanto que o valor mais baixo, no término

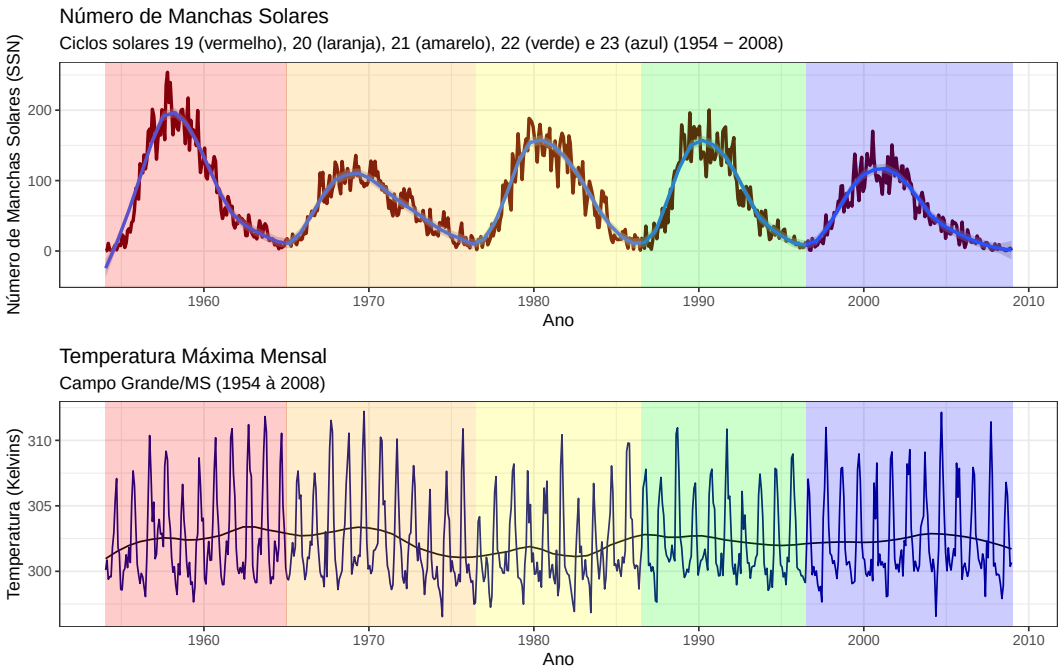


Figura 52 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Campo Grande/MS

desse ciclo. A média suavizada desse série manteve-se entre 305 e 300 Kelvins durante todo o período. Contudo, observa-se que entre 1972 e 1983, aproximadamente, essa média teve valores mais baixos do que nos demais anos. Quanto aos máximos anuais, percebe-se que eles seguem um perfil bastante variável ao longo do tempo, fazendo com que haja anos onde tal valor esteja bem acima de 310, seguidos de anos onde tal valor esteja mais próximo a 305 Kelvins. Já para os mínimos anuais, não se observa grandes variações.

A figura 53 mostra reconstruções dessas séries para uma escala de período de 64 meses. Observa-se que as maiores amplitudes variacionais, para a série relativa à temperatura ocorreram nos ciclos solares 19 e 21. Nos demais ciclos, observou-se uma extensão variacional entre 300 e 305 Kelvins, aproximadamente. Para reconstruir a série temporal no painel inferior, foi necessário utilizar um nível de significância de 0,99, e mesmo com esse valor elevado, ela apresenta uma descontinuidade nos meses próximos ao de número 500. Comparando ambas as reconstituições, observa-se que elas encontram-se aproximadamente em fase.

Para a escala de período de 128 meses, a reconstituição da série relativa a temperatura máxima mostrou-se viável possível apenas entre o mês 1 e 500, mostrando-se descontínua após esse ponto, isto é, ciclo solar 23, conforme mostrado na figura 54. Para essa reconstituição, foi necessário um nível de significância igual à 0,9. Nesses gráficos, observa-se que as maiores extensões variacionais ocorreram nos ciclos 20 e 21. Nos ciclos 19 e 22 observa-se amplitudes relativamente baixas. Comparando ambas as reconstruções, percebe-se que elas também encontram-se em fase.

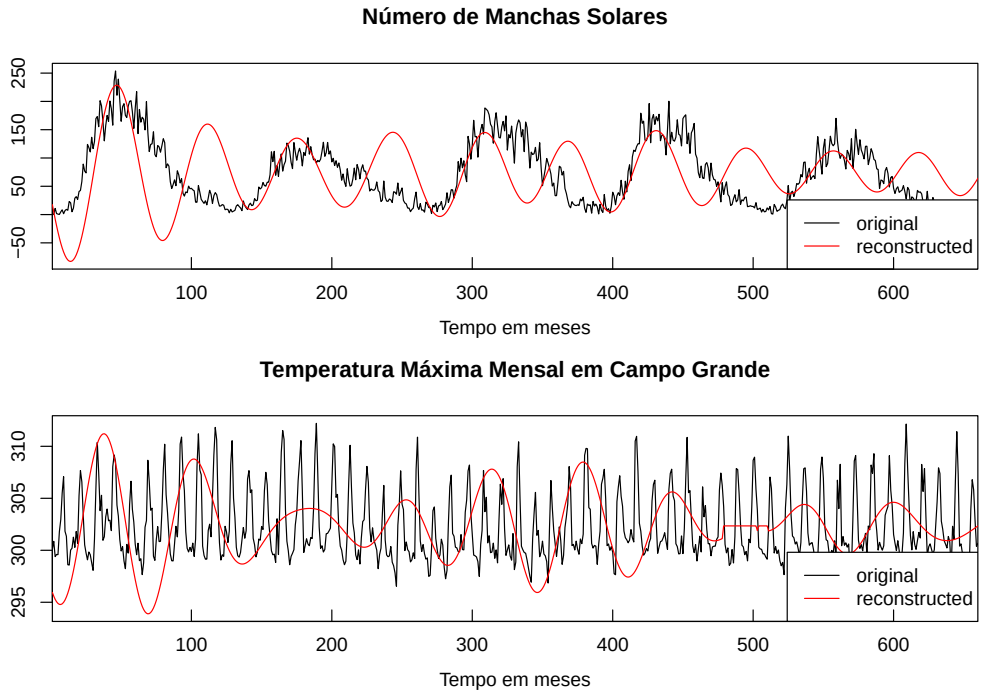


Figura 53 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

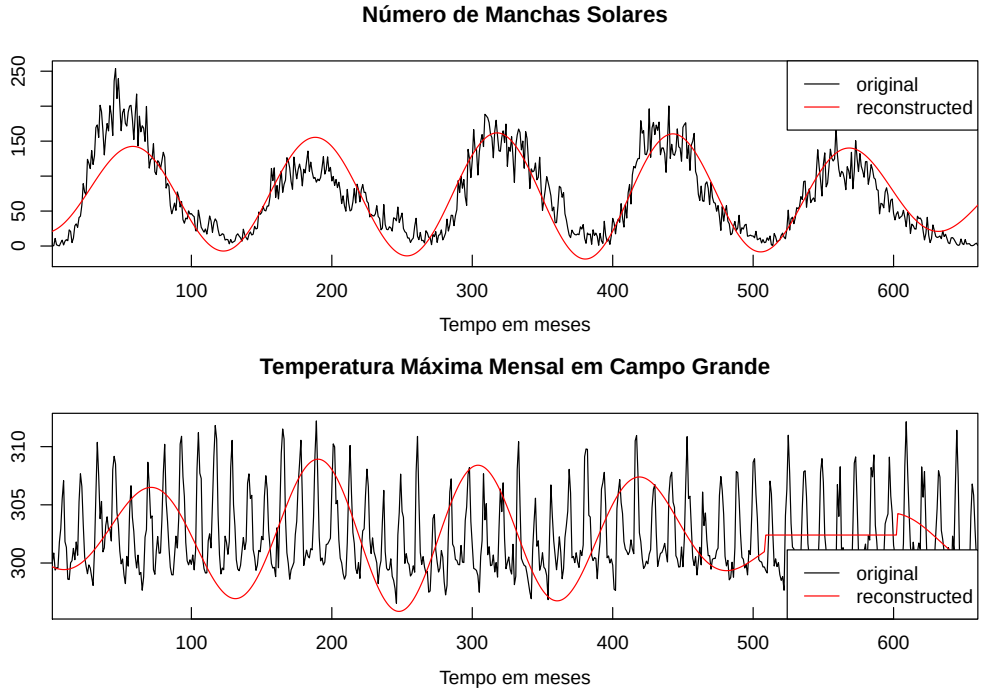


Figura 54 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Reconstituindo essas séries para uma periodicidade de 256 meses, observa-se um perfil contínuo e diferenciável em ambos os casos, para todo o domínio $t \in [1, 660]$. A reconstrução da série relativa a temperatura máxima em Campo Grande possui amplitudes

iguais ao longo de todo o tempo. Comparando as duas ondas resultantes, nota-se que elas encontram-se em defasagem de aproximadamente meio ciclo (i.e 11 anos ou 180º), conforme mostrado na figura 55.

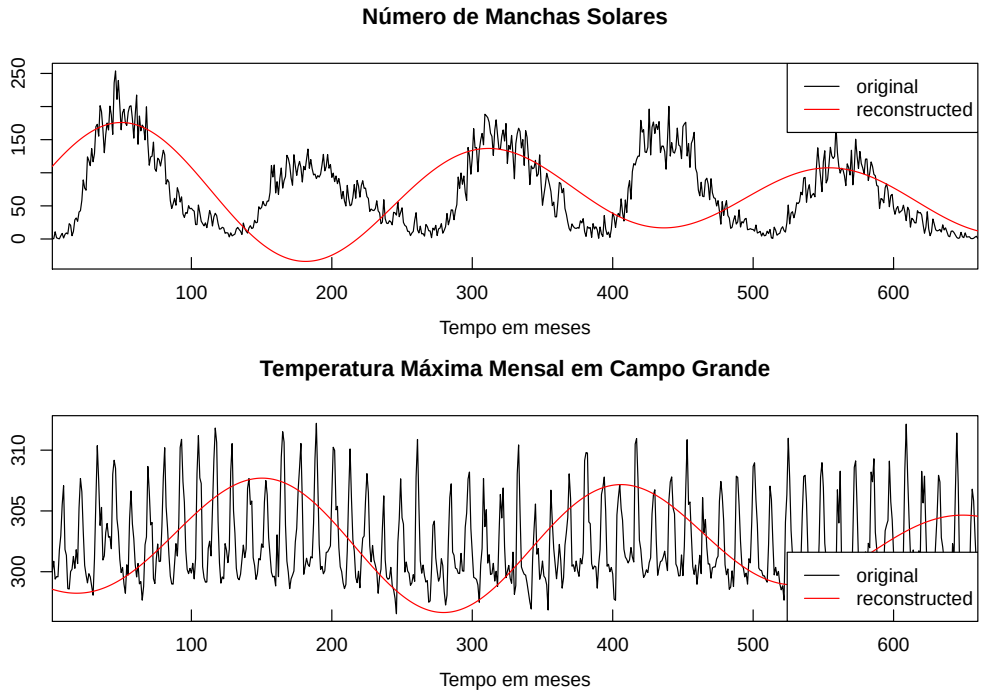


Figura 55 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Na figura 56 é mostrada as Análises de Coerência Wavelet entre os índices de atividade solar e a temperatura superficial máxima em Campo Grande. Em ambos os casos, nota-se que o níveis de coerência espectral próximos a 1 ocorreram para os períodos entre 256 e 512 meses, durante todo o tempo de estudo. As setas voltadas para cima indicam que, para essas escalas de períodos, as duas séries encontram-se defasadas em 1 quarto de ciclo, ou em 90º.

Para periodicidades próximas a 11 anos, os maiores níveis de coerência foram entre 0,7 e 0,8 entre os meses 120 e 180, e entre os meses 380 e 500. No primeiro intervalo, as setas voltadas para o lado direito indicam um ângulo de fase próximo a 0º. Já no segundo intervalo, observa-se uma diferença de fase próxima a 270º. Também é possível observar níveis de coerência espectral para períodos próximos a 32 meses, com uma diferença de fase próxima a 270º.

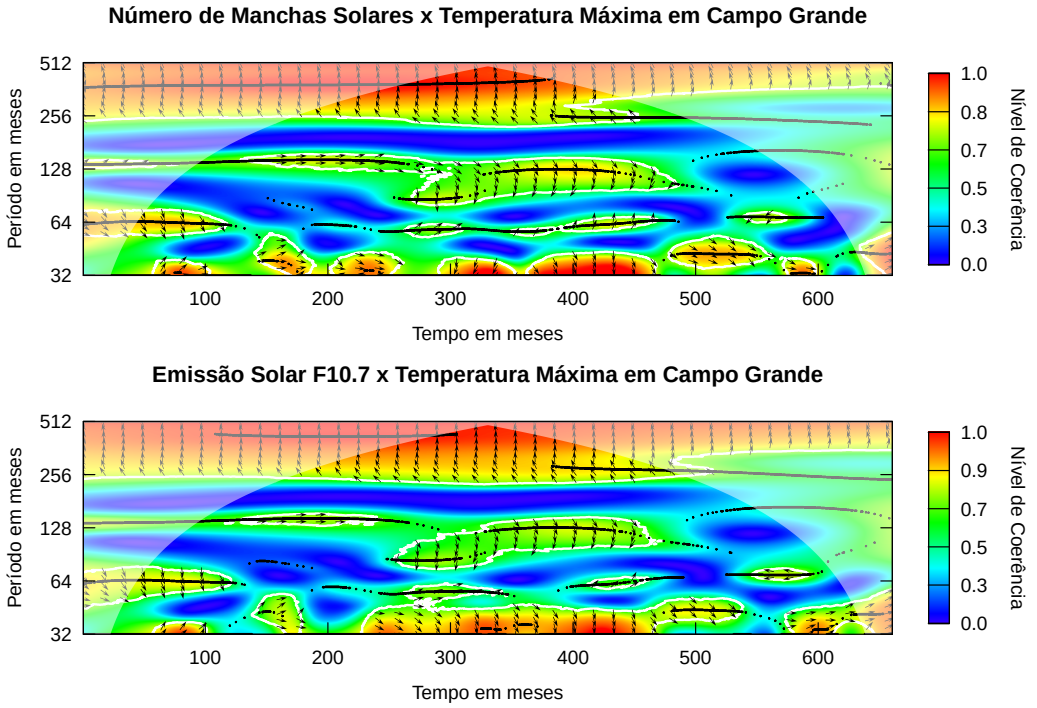


Figura 56 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial máxima em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

4.3.2 Curitiba

A série temporal relativa a temperatura superficial máxima em Curitiba/PR pode ser vista na figura 57, paralelamente com o Número Mensal de Manchas Solares. A média suavizada dessa série manteve-se entre 295 e 297,5 Kelvins ao longo do tempo, apresentando apenas uma variação mais acentuada na transição do ciclo solar 21 para o 22. Nos demais ciclos, observa-se apenas umas variações pequenas. O maior valor desse série ocorreu na transição do ciclo solar 19 para o 20, onde foi registrado um valor próximo a 303 Kelvins. Os dois valores mais baixos, foram observado no pico do ciclo solar 19. Quanto os máximos sazonais, observa-se que a maioria deles estiveram abaixo da marca de 300 Kelvins, havendo apenas uns poucos anos onde tal valor ultrapassou essa marca. Quanto aos mínimos anuais, nota-se que eles oscilaram em torno de 292,5 Kelvins.

Reconstruindo a série temporal relativa a temperatura superficial máxima observada em Curitiba, mostrada na figura 58, para a escala de período de 64 meses, obteve-se uma curva contínua e diferenciável ao longo de todo o seu domínio, usando um nível de significância de 0,99. Quanto a amplitude variacional, observa-se valores baixos nos ciclos 19 e 20. Somente após o ciclo 21 é possível visualizar amplitudes variacionais mais elevadas. Quanto ao ângulo de fase, percebe-se que ambas as reconstruções encontram-se em fase entre os meses 1 e 500. Após isso, percebe-se uma defasagem próxima de meio ciclo.

Para a escala de período de 128 meses, as reconstituições mostradas na figura

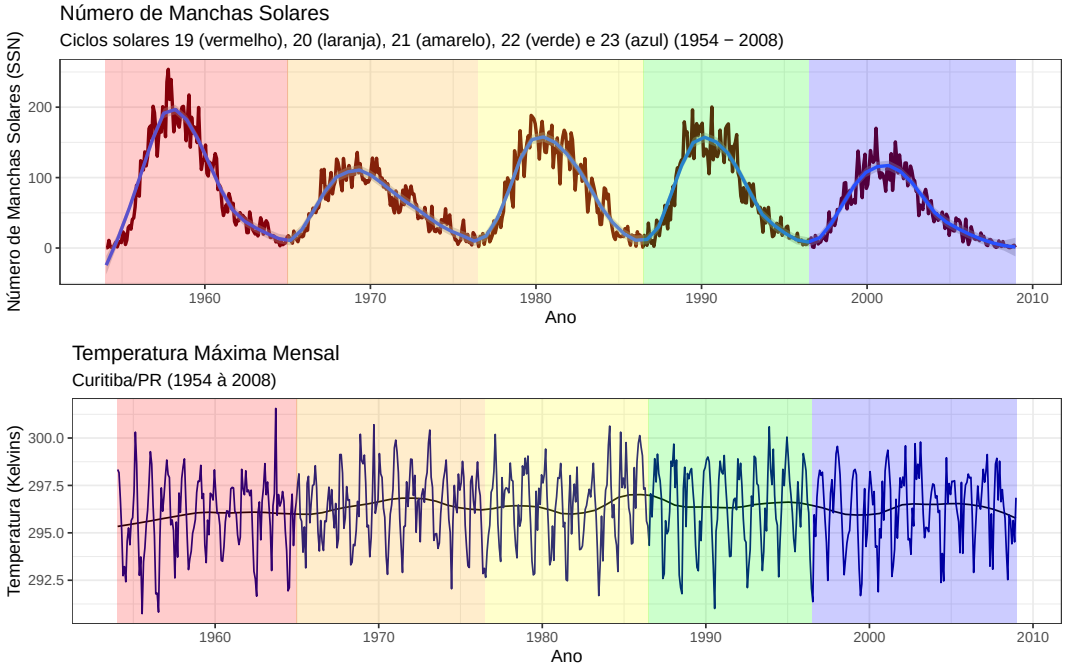


Figura 57 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Curitiba/PR

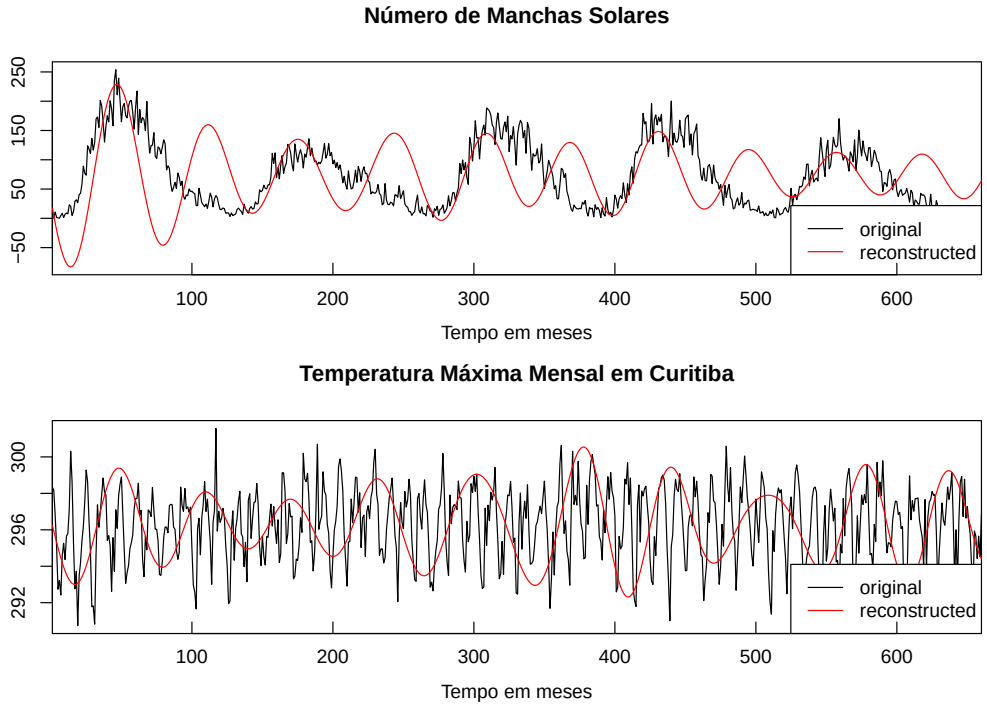


Figura 58 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

59 apresentam um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. As amplitudes variacionais apresentam-se contante ao longo do tempo, exceto no ciclo solar 20, onde observa-se uma amplitude mais baixa. Quanto a diferença de fase, observa-se que entre o mês 1 e o 200, as duas reconstruções encontram-se em fase. Após isso, nota-se que elas se encontram em oposição de fase.

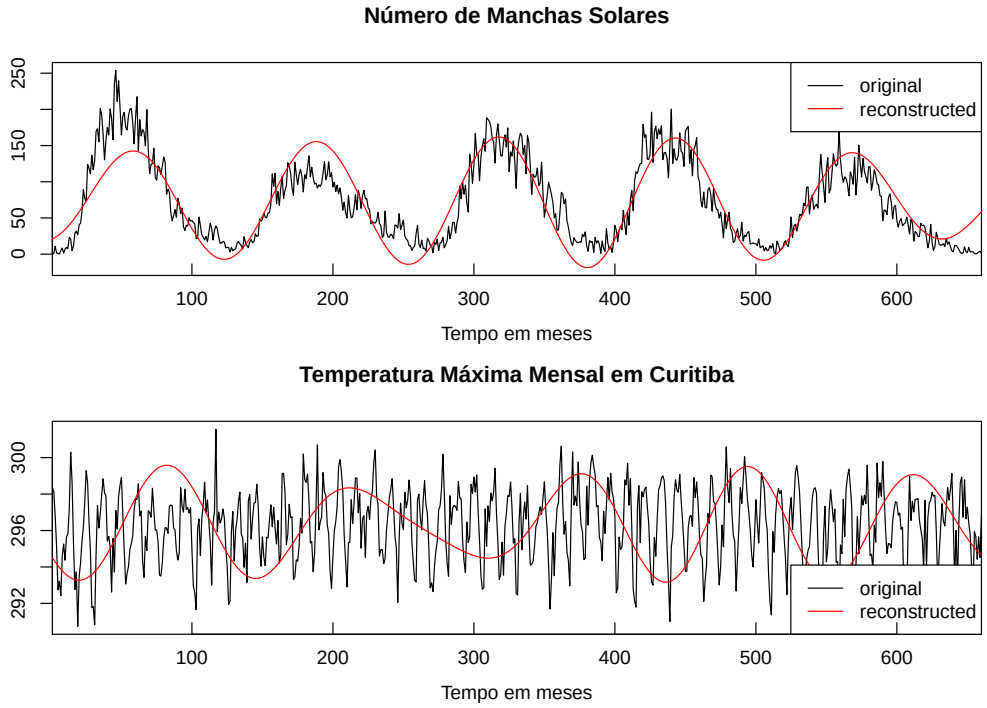


Figura 59 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Na figura 60 é mostrada a reconstituição dessa série para a periodicidade de 256 meses. Semelhante ao caso anterior, observa-se um perfil contínuo e diferenciável na curva ao longo de todo do seu domínio. A extensão variacional da curva mostrada no painel inferior manteve-se entre 294 e 300 K em todos os ciclos solares, apresentando um comportamento aproximadamente constante. Comparando ambas as reconstituições mostradas na figura, percebe-se que as mesmas encontram-se com uma defasagem de meio ciclo, ou seja, em oposição de fase.

Por fim, na figura 61 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre o Número de Manchas Solares/Emissão Solar F10.7 e a temperatura superficial máxima em Curitiba. Para a escala de períodos entre 512 e 256 meses, observa-se níveis de coerência espectral superiores a 0,7 na relação Número de Manchas Solares/Temperatura, entre o mês 1 e o 350, assim como níveis de coerência superior a 0,8 na relação Emissão Solar F10.7/Temperatura. Nos dois casos citados, a presença de setas voltadas para o lado esquerdo indicam que as séries estão com defasagem de meio comprimento de onda, e portanto, em anti-fase.

Em relação a periodicidade de 11 anos, nota-se nas duas relações níveis de coerência superiores a 0,7 entre o mês 1 e 250, e após o mês 350. No primeiro intervalo citado, as setas indicam um ângulo de fase próximo a 90º. Já para o segundo intervalo, observa-se uma diferença de fase próxima a 180º, ou seja, correlação negativa.

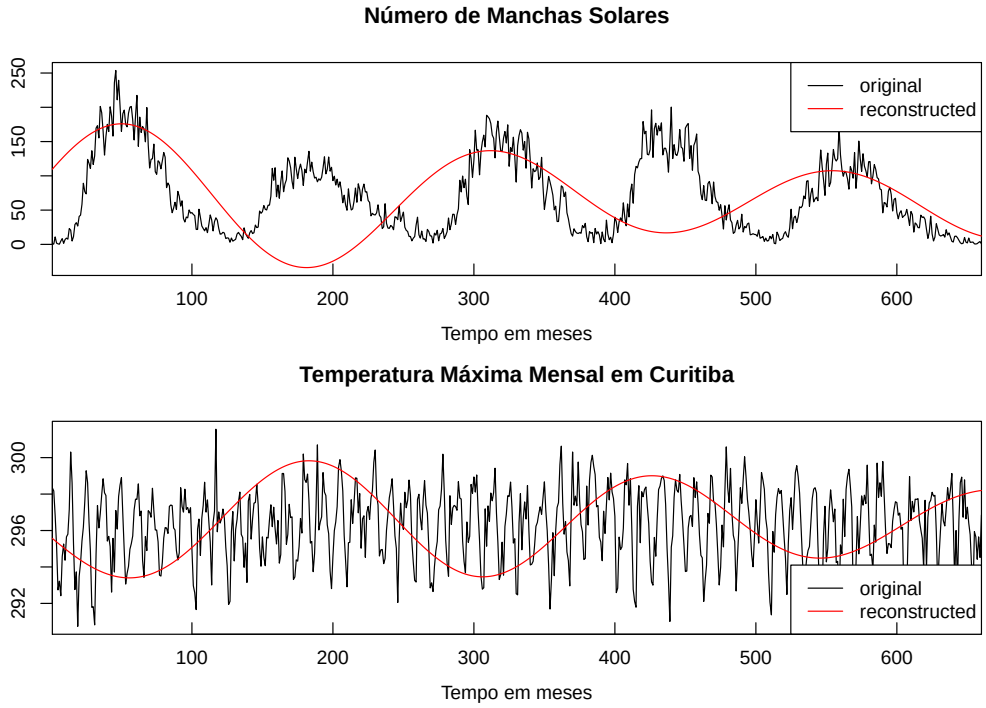


Figura 60 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

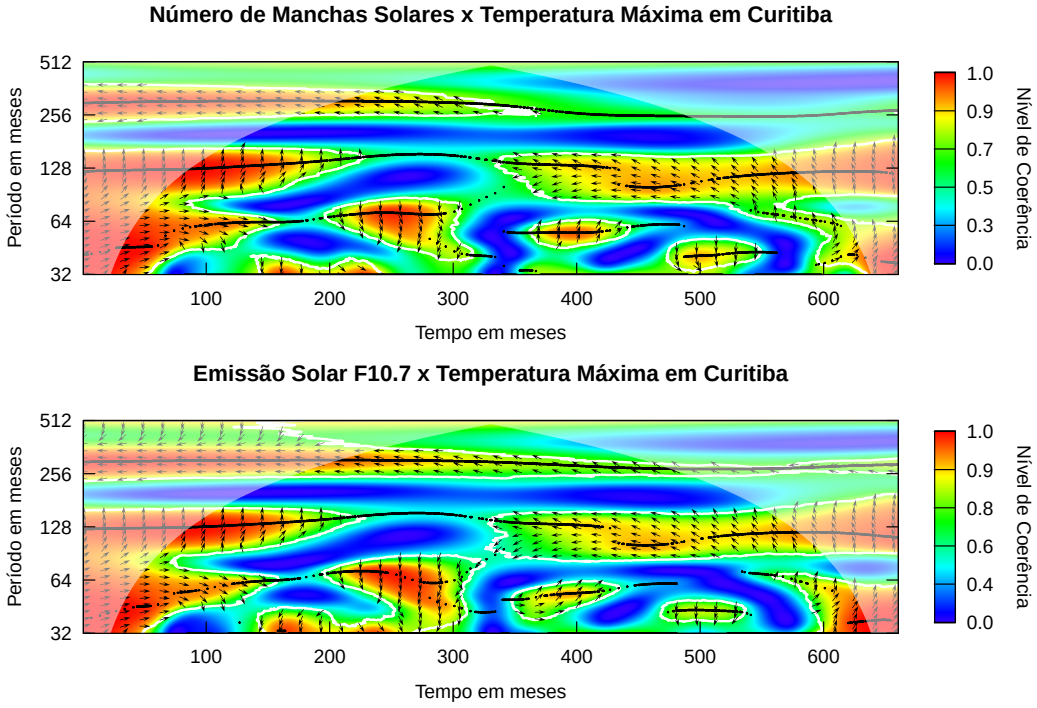


Figura 61 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

4.3.3 Porto Alegre

A figura 62 mostra a representação gráfica da série temporal relativa a temperatura superficial máxima em Porto Alegre/RS. A média suavizada dessa série possui um perfil

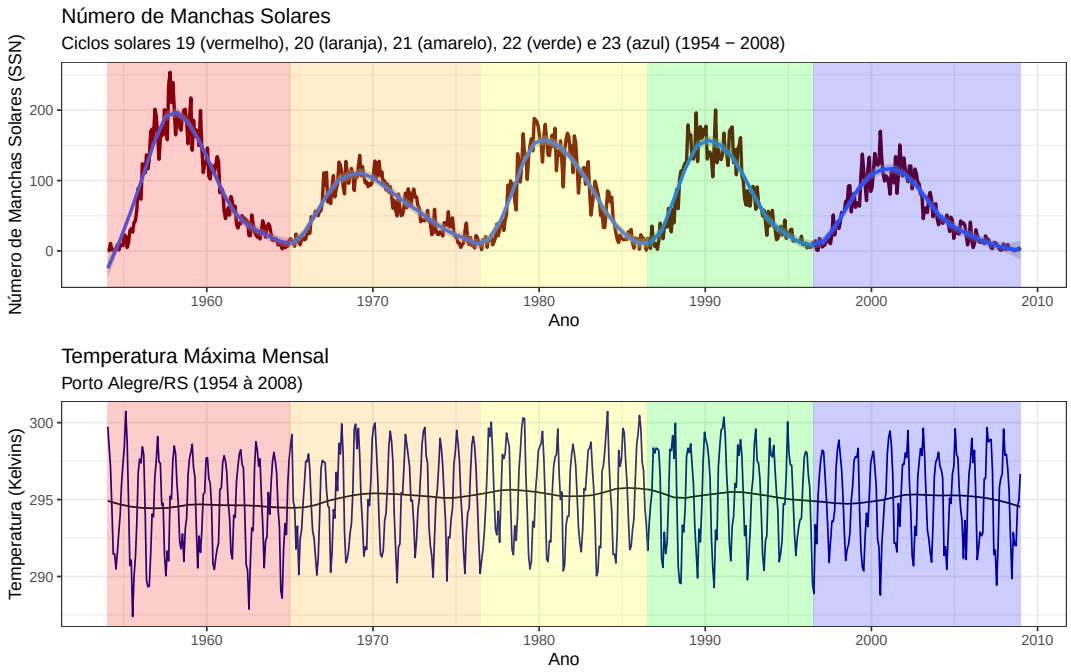


Figura 62 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Porto Alegre/RS

aproximadamente constante e oscilando em torno da marca de 295 Kelvins. As maiores variações nessa média pode ser vista durante o ciclo solar 20, onde ela sofre um pequeno aumento e na transição entre o ciclo 21 e 22, onde observa-se pequenas flutuações. Também é possível observar uma pequena diminuição nessa média durante a primeira metade do ciclo solar 19. Quanto aos máximos anuais, observa-se valores bem abaixo de 300 Kelvins, entre os ciclos 19 e 20, e na transição do ciclo 22 para o 23. Quanto aos mínimos, observa-se que eles estiveram próximos a marca de 290 durante quase todo o tempo. Os valores maiores e menores dessa série foram observados na fase de crescimento do ciclo solar 19.

Na parte inferior figura 63 é mostrada a série temporal relativa à temperatura superficial máxima observada em Porto Alegre, assim como a sua reconstituição para uma periodicidade de 64 meses, a qual apresenta um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. Durante os ciclos solares 19 e 20, a reconstrução possui uma faixa variacional entre 290 e 300 Kelvins, e varia em fase com a reconstituição da série relacionada ao Número de Manchas Solares. Durante a fase de declínio do ciclo solar 21 e de crescimento do 22, observa-se uma maior amplitude variacional, a qual vai de 288 a 302 Kelvins. Após esse intervalo, nota-se que essa extensão variacional torna a valores próximos aos anteriores. Após o ciclo solar 21, percebe-se que as reconstituições passam a variar em oposição de fase.

Reconstruindo essa série temporal para uma escala de período de 128 meses, obtém-se o gráfico mostrado na parte inferior da figura 64, onde observa-se uma descontinuidade durante a fase de declínio do ciclo solar 21, mesmo utilizando um nível de significância de 0,99. Durante quase todo o tempo, percebe-se que a amplitude variacional dessa

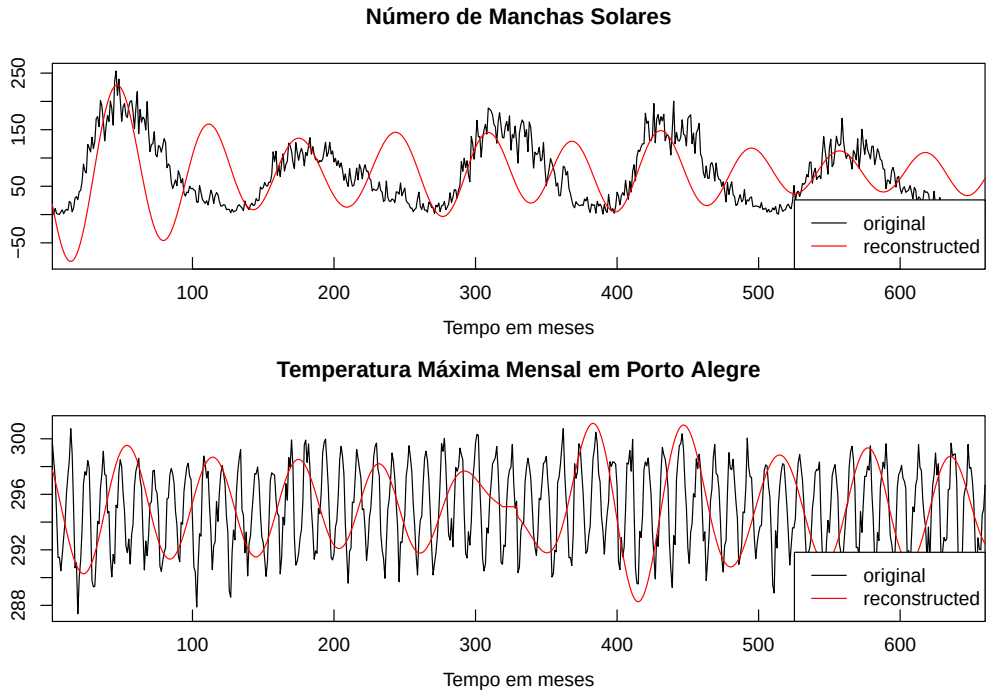


Figura 63 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

reconstituição manteve-se entre, aproximadamente, 300 e 290 Kelvins. Além disso, nota-se que durante os ciclos solares 19, 20 e parte do 21, as duas reconstruções variam aproximadamente em fase, enquanto que, durante os ciclos 22 e 23, elas variam fora de fase.

Nos gráficos mostrados na figura 65 tem-se essa mesma reconstituição, mas para a periodicidade de 256 meses, onde também se nota um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o domínio. Nessa situação, percebe-se que ambas as reconstituições variam em oposição de fase durante todo o tempo. Nos ciclos solares 19 e 20 observa-se uma amplitude variacional entre 300 e 290 Kelvins, enquanto que nos demais, uma extensão variacional entre 292 e 298 Kelvins.

Por fim, na figura 66 são mostradas as Análises de Coerência Wavelet entre os índices de atividade solar e a temperatura superficial máxima na cidade do Rio de Janeiro. Para períodos entre 512 e 256 meses, observa-se nível de coerência espectral superior a 0,7 entre o mês 1 e 500 na relação Número de Manchas Solares/Temperatura, e durante todo o tempo, para a relação Emissão Solar F10.7/Temperatura. No caso mostrado na parte superior, nota-se que a diferença angular entre as séries, nessa faixa de periodicidade, situa-se no terceiro quadrante do círculo trigonométrico, até o mês 200, e próximo a 270º, entre o mês 200 e o 500. No segundo caso, percebe-se que a diferença angular entre as séries mantem-se próximas a 270º durante todo o tempo.

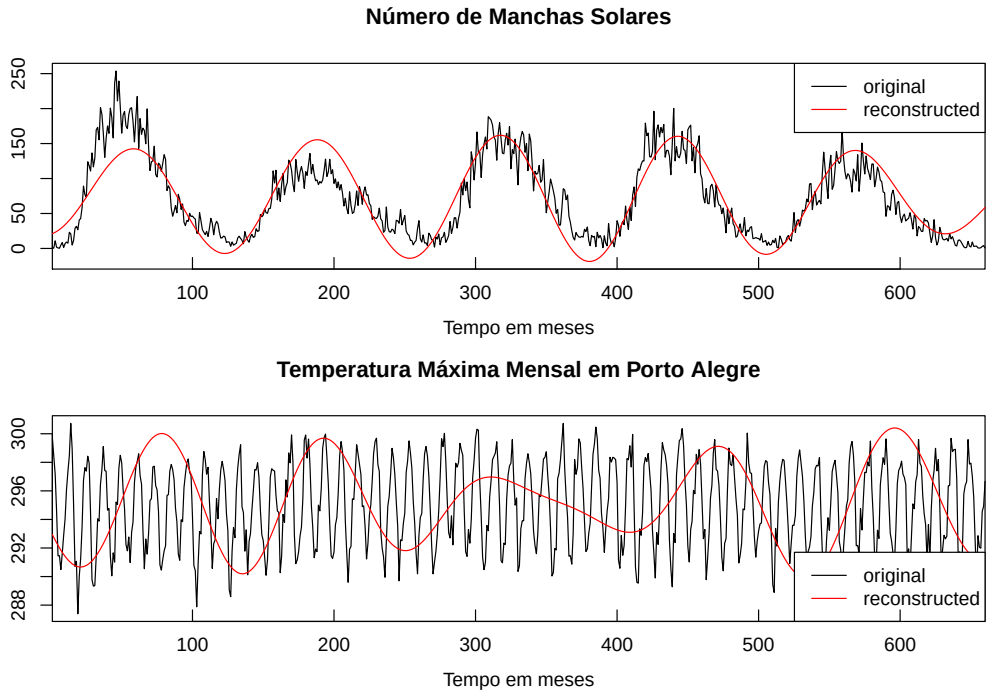


Figura 64 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

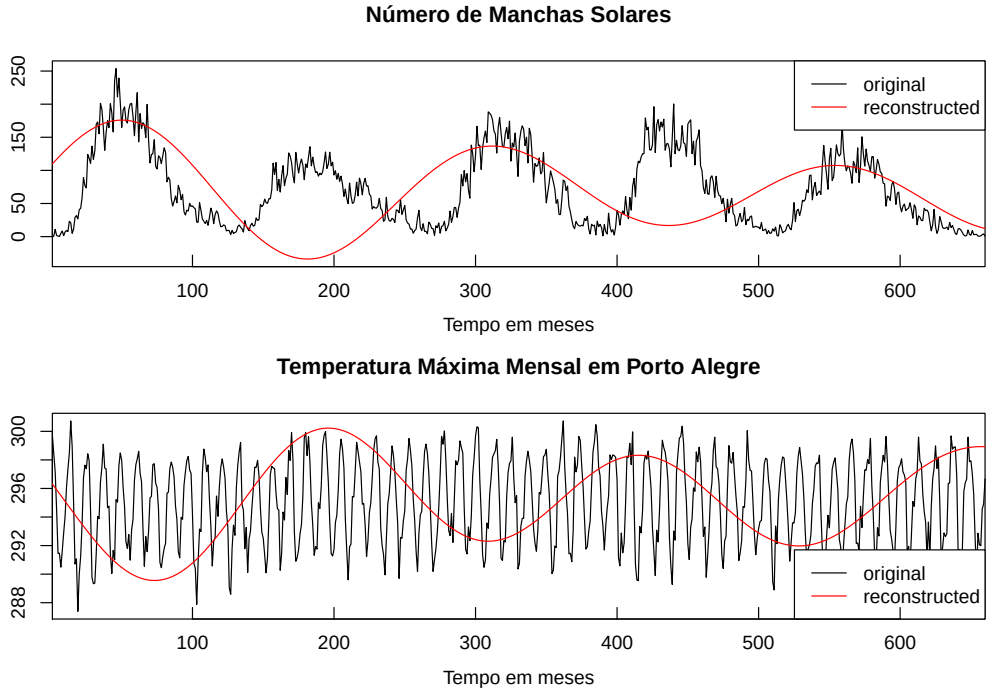


Figura 65 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Para periodicidades de 128 meses, observa-se níveis de coerência maiores que 0,7 entre o primeiro e o 250º mês, e após o 450º mês. Em ambos os intervalos, observa-se a presença de seta situadas no primeiro quadrante do círculo trigonométrico, indicando

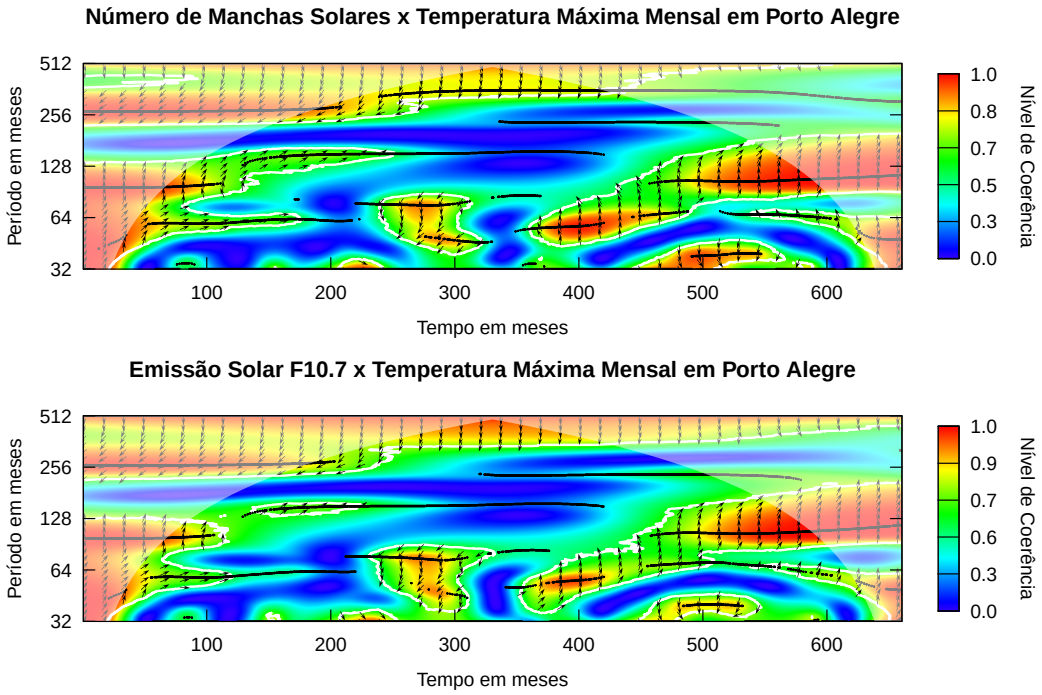


Figura 66 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

assim que, para tais momentos, as séries estão em fase. Já para a escala de período de 64 meses, percebe-se graus de coerência próximos a 1 em algumas regiões isoladas da figura, as quais estão indicadas pelas manchas vermelhas.

4.3.4 Rio de Janeiro

Por fim, na figura 67 mostra os dados relativos a temperatura superficial máxima mensal para a cidade do Rio de Janeiro. Nesse gráfico, percebe-se que a média suavizada dos dados possui um perfil mais variável, mantendo-se entre 300 e 295 Kelvins ao longo do tempo. Picos nessa curva podem ser vistos durante os ciclos 19, 20 e 23. De um modo geral, nota-se que a amplitude dos valores esteve entre 295 e 302,5 Kelvins. Contudo, percebe-se que na transição do ciclo solar 19 para o 20, foram observado valores acima do limite superior desse intervalo, enquanto que no pico do primeiro ciclo solar da série, observou-se um valor abaixo do limite inferior.

Na figura 68 tem-se as reconstituições das séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares e Temperatura Superficial Máxima para a cidade do Rio de Janeiro para a escala de período de 64 meses. Ambas as reconstituições possuem um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. Nos ciclo 19 à 22, observa-se uma amplitude variacional pequena para a série relativa a temperatura, e que ela varia em fase com o Número de Manchas Solares. No ciclo solar 23, observa-se grandes amplitudes variacionais,

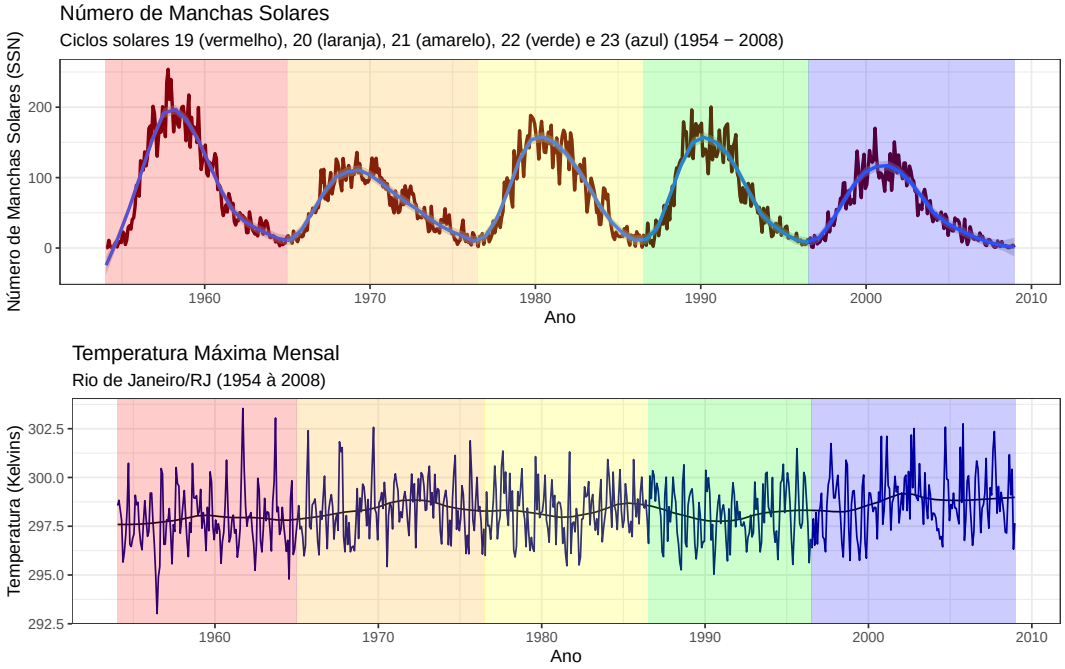


Figura 67 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Máxima em Rio de Janeiro/RJ

e uma diferença de fase próxima a meio ciclo.

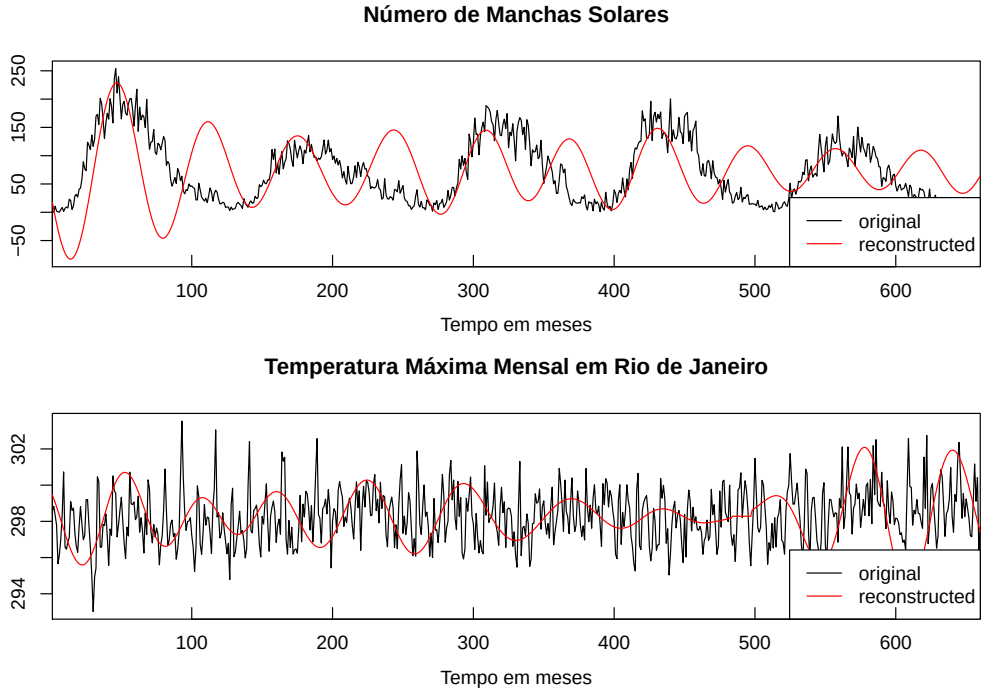


Figura 68 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Reconstruindo essa série relativa a temperatura máxima, obtém-se a curva mostrada na parte inferior da figura 69, onde é possível perceber um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o intervalo de tempo. Observa-se que ambas as curvas variam em

oposição de fase durante todo o tempo e estudo, e, além disso, nota-se que a amplitude variacional permaneceu dentro do intervalo 296 - 300 Kelvins.

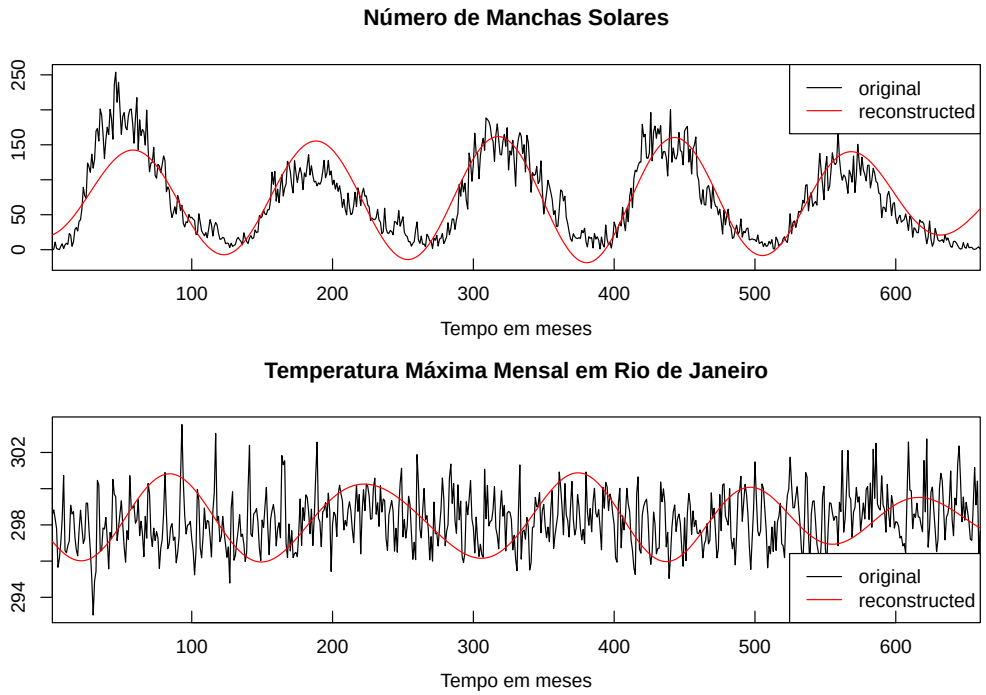


Figura 69 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Para a escala de período de 256 meses, a reconstituição da série apresenta um perfil contínuo e diferenciável por partes, havendo uma descontinuidade no máximo do ciclo solar 21. Durante os ciclos 19 e 20, percebe-se uma amplitude variacional entre 296 e 300 Kelvins e uma defasagem de meio ciclo entre as duas séries. Após a descontinuidade, observa-se uma maior extensão variacional e que as duas séries passam a oscilar em fase, para essa periodicidade, conforme mostrado na figura 70.

Por fim, na figura 71 tem-se as Análises de Coerência Índices de Atividade Solar/Temperatura Máxima em Rio de Janeiro. Nos dois casos mostrados nessa figura, observou-se nível de coerência espectral superiores a 0.8 para a escala de períodos entre 256 e 512 meses, durante todos os 660 meses das séries. As setas voltadas para o lado esquerdo indicam que as duas séries estão em oposição de fase. Para a periodicidade de 128 meses, observou-se na relação Número de Manchas Solares/Temperatura Máxima níveis de coerência espectral superior a 0,7 entre o mês 1 e o 550, havendo inclusive intervalos de tempo onde o grau de coerência atingiu valores próximos a 1, como entre o mês 1 e 200.

Na relação Emissão Solar F10.7/Temperatura Máxima, é observado níveis de coerência superior a 0,8 para o intervalo de tempo entre o mês 1 e 200, e entre o mês 300 e 500. Quanto a diferença angular de fase, percebe-se que em ambas as relações, a mesma

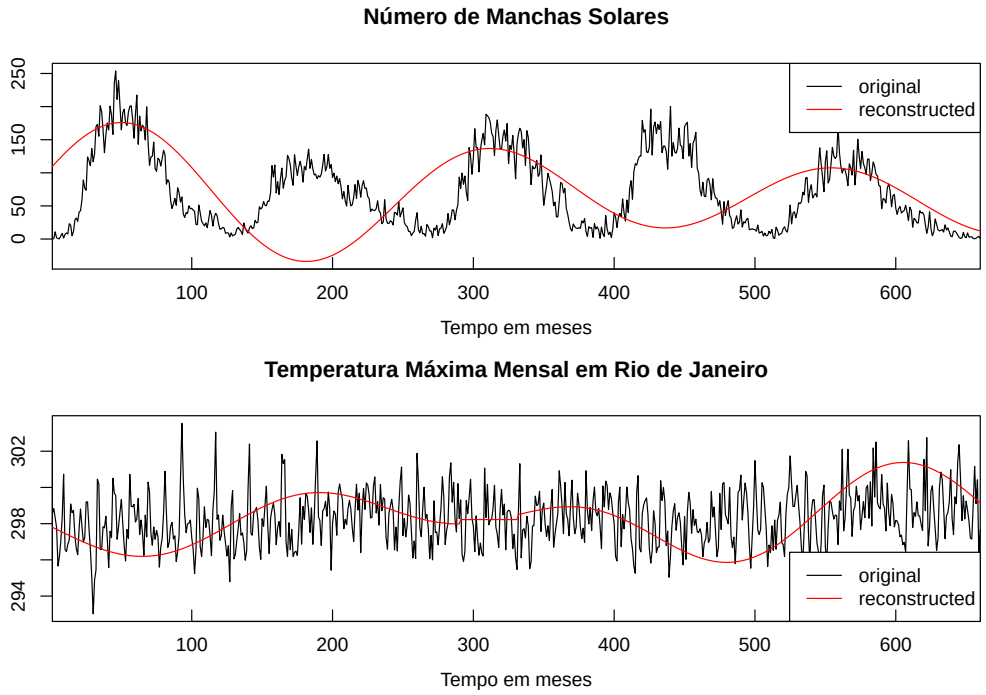


Figura 70 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial máxima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

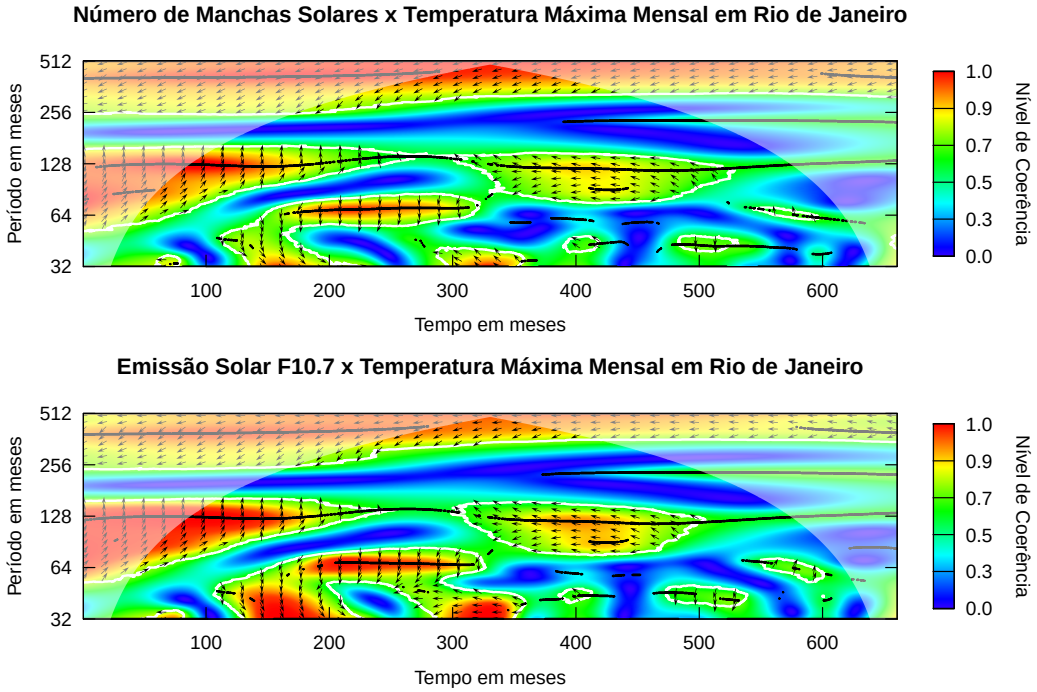


Figura 71 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial média em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

assume valores próximos a 90º entre o primeiro e o 200º mês. Entre os meses 300 e 400, nota-se que tal diferença passa a ter valores a 180º, indicando, desse modo, que as séries estão em oposição de fase, nesse intervalo de tempo.

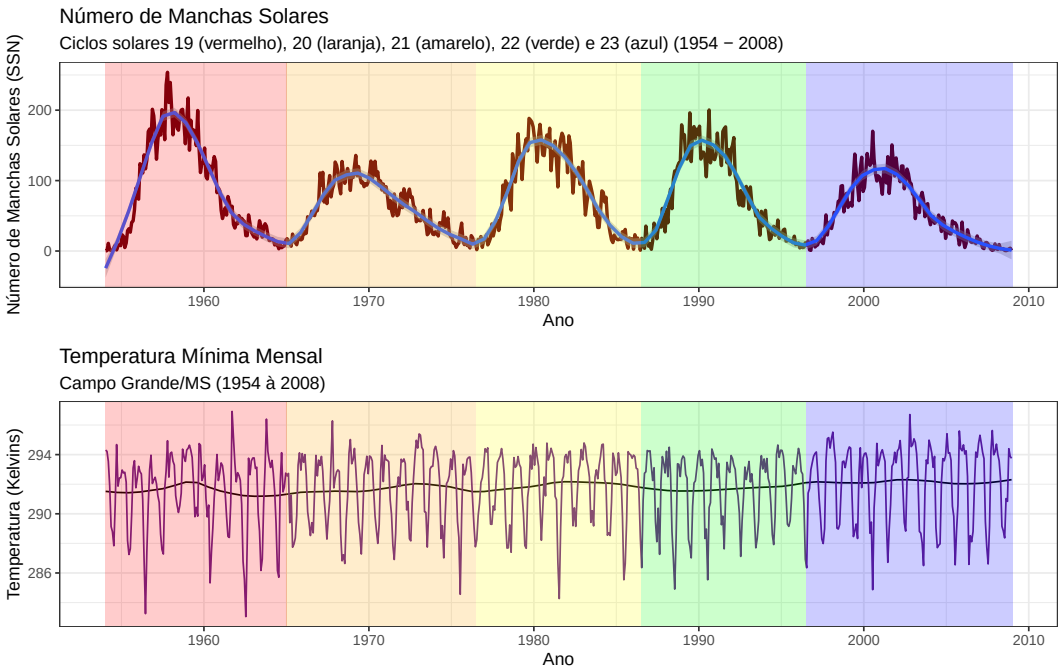


Figura 72 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Campo Grande/MS

4.4 Temperatura Superficial Mínima

4.4.1 Campo Grande

A figura 72 mostra o gráfico dos dados relacionados a temperatura superficial mínima, obtidos no município de Campo Grande/MS, durante os anos de 1954 à 2008. Nesse gráfico, percebe-se que a média suavizada da série sofrera poucas oscilações ao longo do tempo, mantendo-se próxima à 292 Kelvins. Nota-se apenas um pequeno pico nessa média durante o máximo solar do ciclo 19. De modo geral, é notável que a variação da temperatura mínima esteve entre 286 e 296 Kelvins. O valor mais alto dessa série foi de aproximadamente 298 Kelvins, durante o fim do ciclo solar 19, enquanto que o menor valor, próximo a 282 Kelvins, também durante o ciclo solar 19.

Os gráficos mostrados na figura 73 denotam a reconstrução das séries temporais relativas ao Número de Manchas Solares e Temperatura Superficial Mínima na cidade de Campo Grande, durante o período dessa pesquisa. Nessa imagem, observa-se uma descontinuidade na reconstrução da série relativa à temperatura máxima, durante a fase de declínio do ciclo solar 21. Nos ciclos solares 20, 21 e 22 foi detectado baixa potência da série para essa periodicidade, o que é denotado pela pequena amplitude da reconstrução durante esse período. Potências mais elevadas somente foram observadas no ciclo solar 19 e 23. Comparando ambas reconstruções, observa-se que elas variam em fase ao longo de todo o tempo.

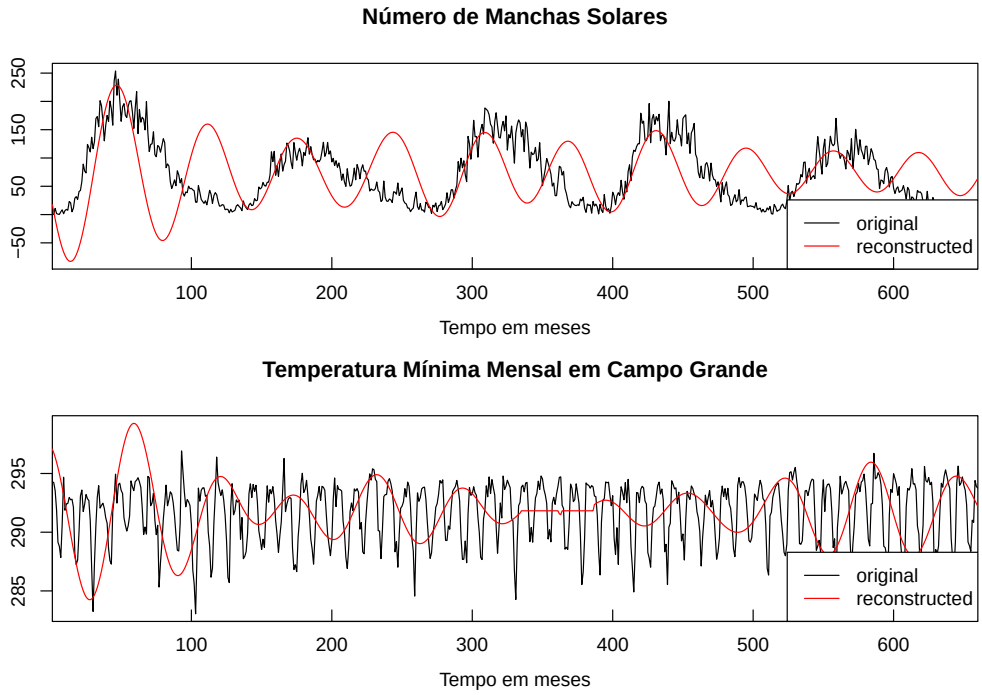


Figura 73 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Reconstruindo ambas as séries para uma escala de período de 128 meses, a figura 74 mostra que a série relativa a temperatura mínima apresenta uma potência Wavelet uniforme e elevada nos ciclos 19, 20 e 21. Nos ciclos solares 22 e 23, observa-se uma diminuição no valor da potência, o que é denotado pela diminuição de amplitude variacional. Uma comparação visual das duas reconstruções sugere que elas encontram-se com uma defasagem de um quarto de ciclo.

Para a periodicidade de 256 meses, os gráficos mostrados na figura 75 indicam uma baixa potência Wavelet entre o mês 1 e 300, e uma potência mais elevada posteriormente. Comparando as reconstruções, percebe-se que elas variam em fase ao longo de todo o tempo.

Por fim, na figura 76 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre as duas séries temporais supracitadas. Níveis de coerência espectral próximos a 1 puderam ser detectados para as escalas de períodos próximas a 512 meses, entre 128 e 64 meses, 32 meses. Para a periodicidade de 512, observa-se esse grau de coerência entre o mês 1 e o 350, com um ângulo de fase situado no terceiro quadrante do círculo trigonométrico.

Para as periodicidades de 128 meses, tal nível de coerência é observado entre o mês 1 e o 45, onde o ângulo de fase varia entre 45º e 90º. Já para períodos entre 64 e 32 meses, percebe-se a presença de algumas regiões mais isoladas, onde o nível de coerência aproxima-se de 1.

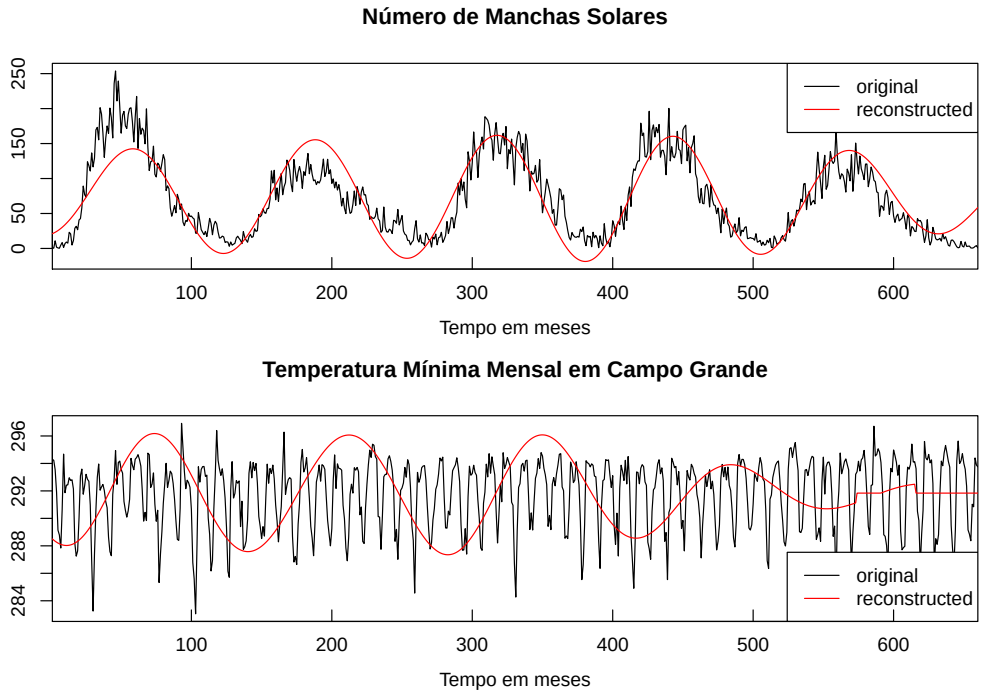


Figura 74 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

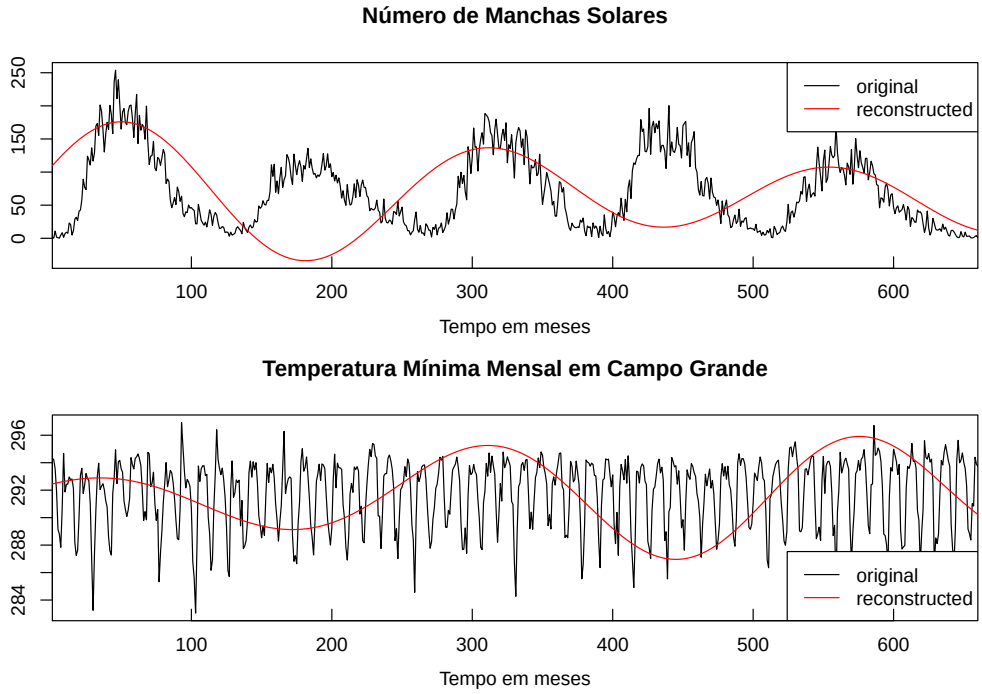


Figura 75 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

4.4.2 Curitiba

Os gráficos mostrados na figura 77 mostram que a média suavizada dos dados relacionados à temperatura superficial mínima esteve entre 290 e 287 Kelvins. Percebe-se

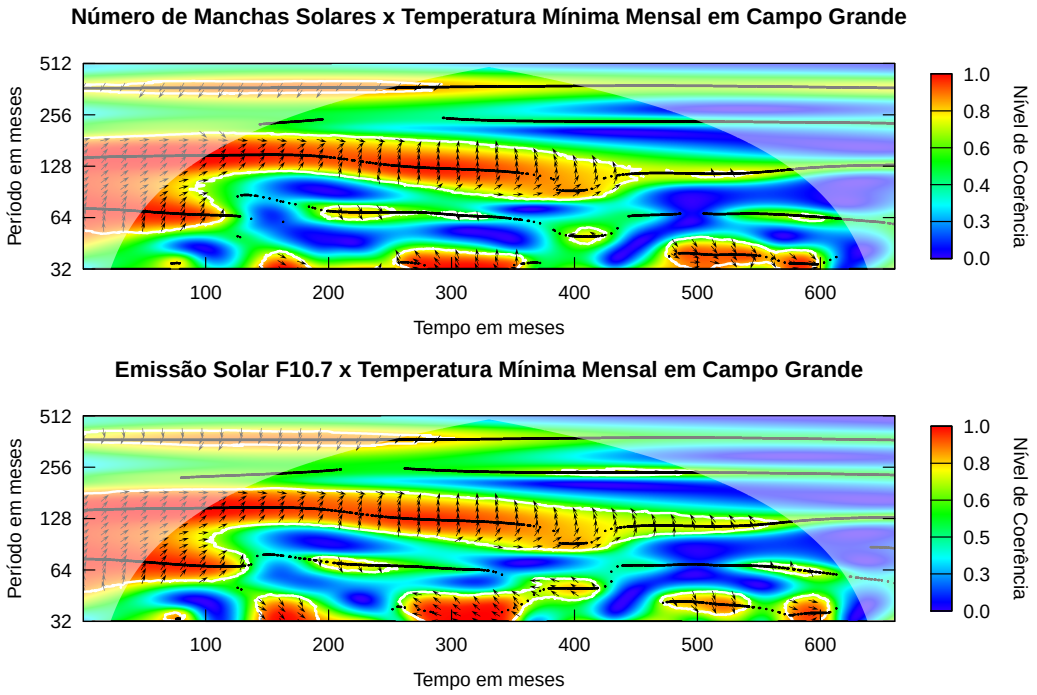


Figura 76 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

que essa média sofre algumas oscilações ao longo do tempo, sendo as mais evidentes a ocorrida durante o ciclo solar 19, onde ela decresceu e depois aumento, e a ocorrida no ciclo 21, onde se observa um pequeno pico. Nos demais ciclos, percebe-se que ela mantem um perfil mais constante ao longo do tempo. Os máximos e mínimos sazonais dessa série apresentam um perfil de variação aparentemente ondulatório, onde se observa processos de aumento e diminuições progressivas. Os valores máximos e mínimos dessa série foram observados durante o ciclo 23.

Reconstruindo a série temporal com respeito a temperatura superficial mínima em Curitiba usando um nível de significância de 0,99 obteve-se uma curva contínua e diferenciável por partes, a qual é mostrada na parte inferior da figura 78. As descontinuidades dessa curva podem ser observadas entre os meses 100 e 200. Quanto a Potência Wavelet, denotada pela amplitude da curva, percebe-se valores baixos entre os meses 100 e 400 da série. Durante o ciclo solar 19, observa-se uma grande amplitude variacional, enquanto que no ciclo 23, valores de amplitude mais moderado. Além disso, no primeiro ciclo solar dessa série, observa-se que as duas reconstituições variam em fase. Após a descontinuidade, percebe-se que elas oscilam fora de fase.

Para a periodicidade de 128 meses, a reconstituição dessa série relativa a temperatura mínima passa a demonstrar um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. Quanto a amplitude variacional, percebe-se que ela manteve-se aproximadamente uniforme ao longo do tempo, exceto entre os ciclos 21 e 22, onde observa-se um aumento em sua magnitude. Durante todo o tempo de estudo, percebe-se que as duas reconstituições

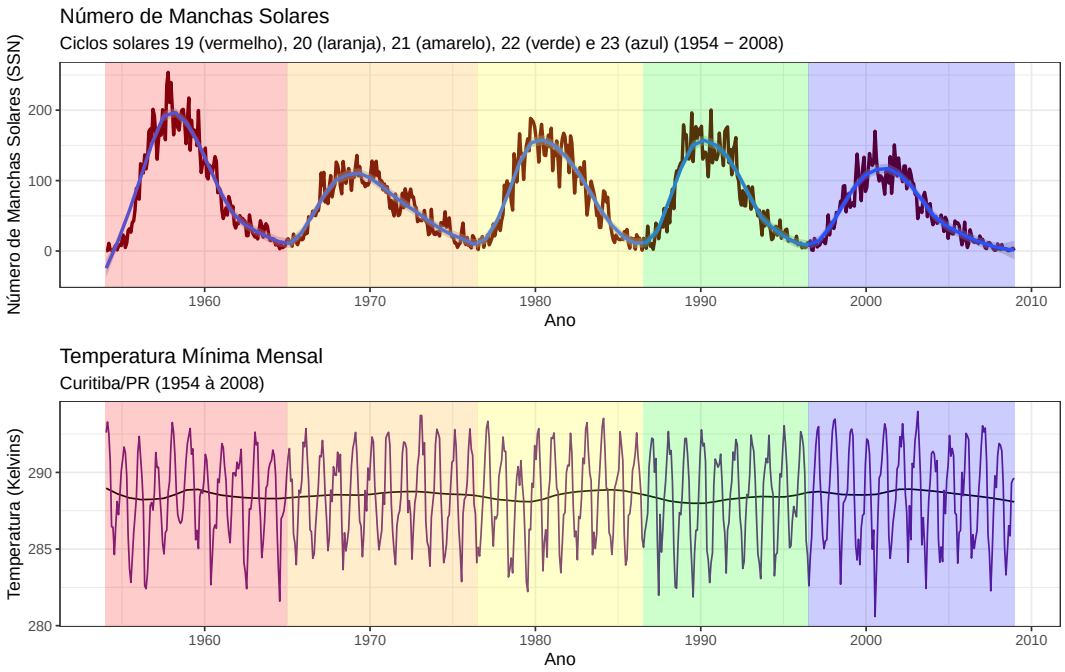


Figura 77 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Curitiba/PR

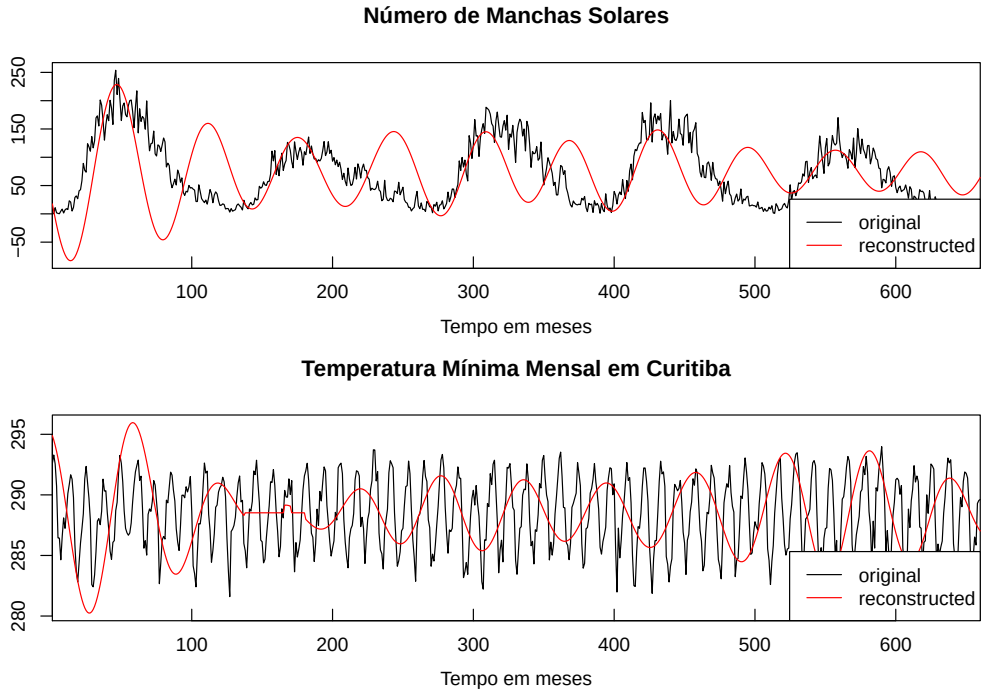


Figura 78 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

mostradas na figura 79 estiveram fora de fase.

Para uma escala de períodos próxima a 22 anos, ou 256 meses, observou-se que, mesmo utilizando um nível de significância de 0,99, só foi possível observar uma reconstrução somente após o a fase de declínio do ciclo solar 20, conforme visto na figura

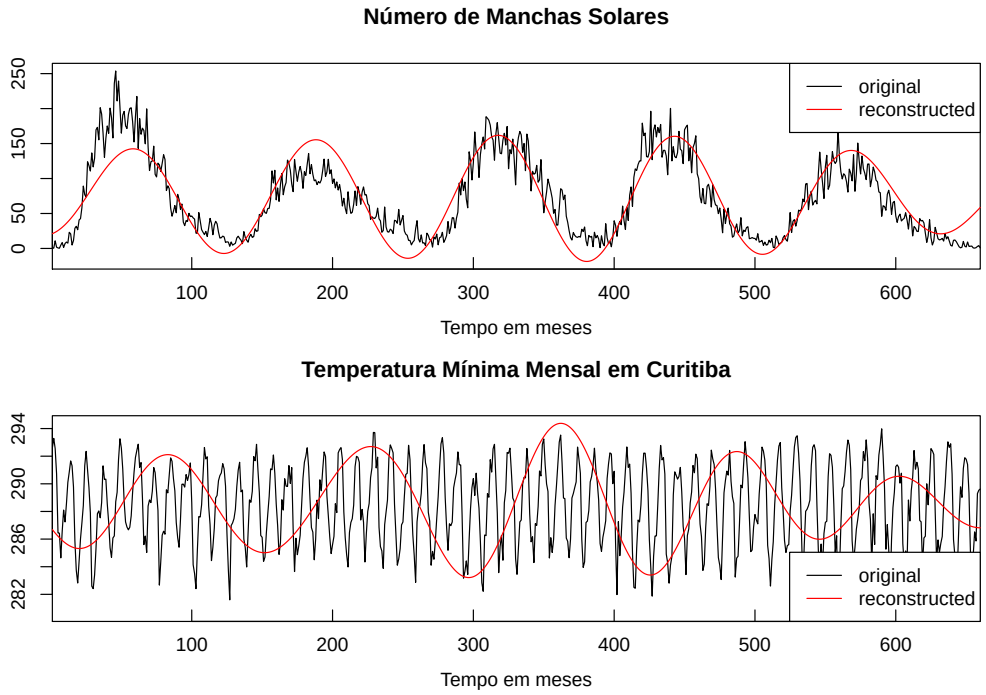


Figura 79 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

80. Enquanto que nos ciclo solar 21 observa-se uma potência relativamente baixa, nos dois ciclos subsequentes, observa-se uma amplitude mais elevada. Além disso, percebe-se que as duas reconstituições variam em fase.

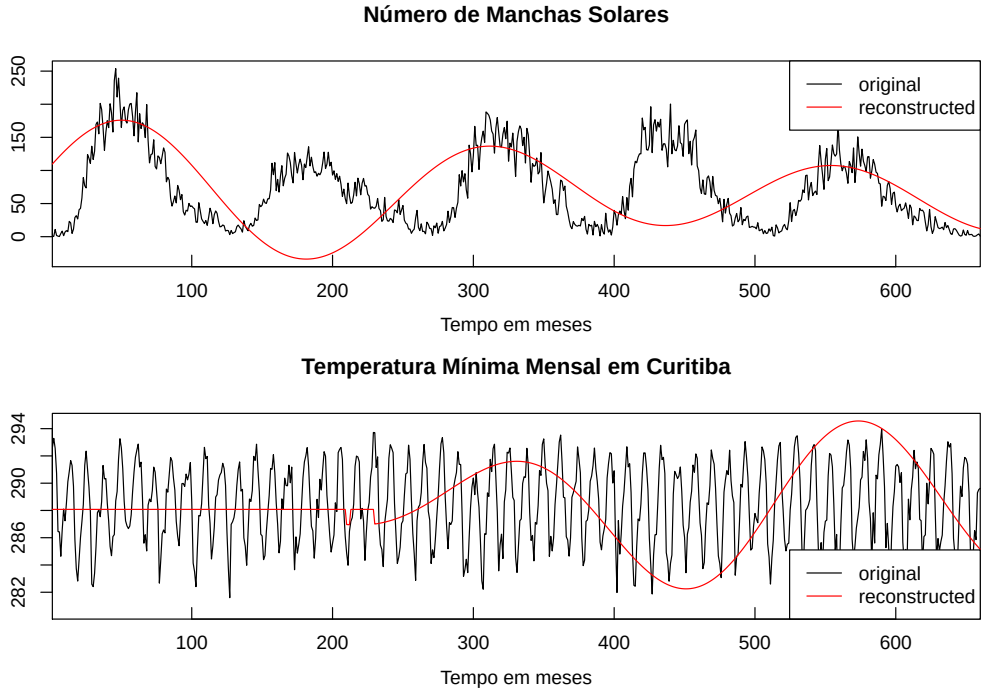


Figura 80 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

A figura 81 mostra o resultado das Análises de Coerência Wavelet entre os índices de atividade solar e a temperatura superficial mínima em Curitiba. Em ambos os gráficos, observou-se que, para a escala de períodos de 512 meses, o grau de coerência entre as séries temporais manteve-se próximo a 1 durante todo o tempo, com um ângulo de fase próximo a 180º. Para a periodicidade de 128 meses, observa-se que o nível de coerência espectral entre as séries esteve acima de 0,7 durante todo o tempo, havendo momentos, inclusive, onde valores próximos a 1 puderam ser detectados, como entre os meses 250 e 550. Em relação a diferença angular de fase, observa-se que o seu valor esteve mais próximo a 90º durante quase todo o tempo. Além disso, percebe-se algumas regiões isoladas, onde o nível de coerência esteve próximo a 1, para escalas de períodos entre 32 e 64 meses.

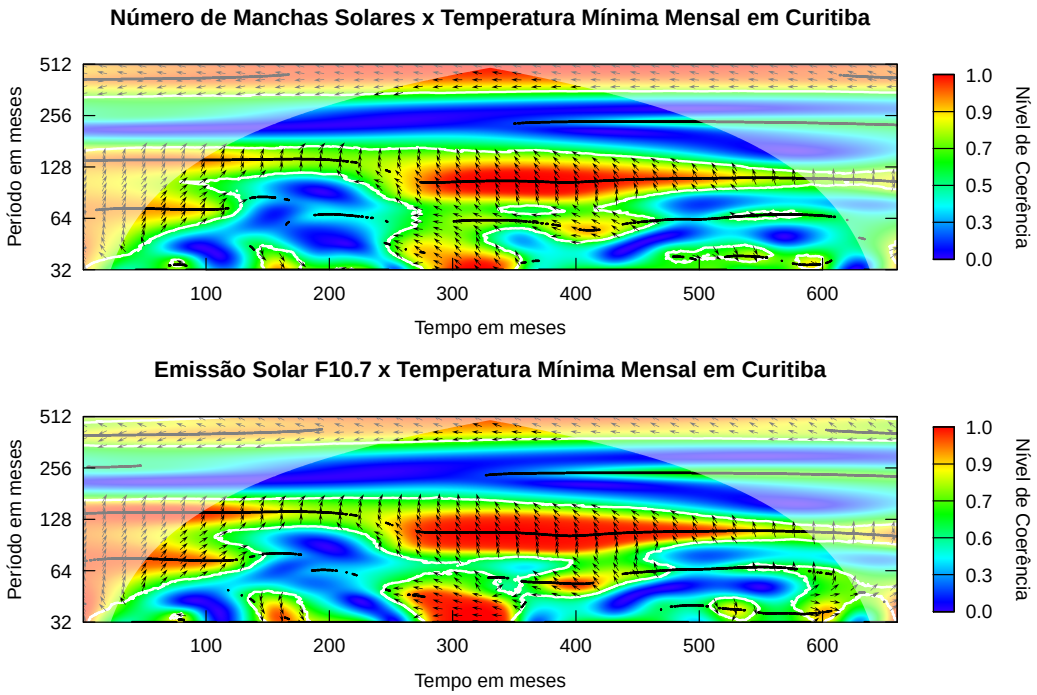


Figura 81 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

4.4.3 Porto Alegre

A figura 82 mostra a série temporal relativa a temperatura superficial mínima em Porto Alegre/RS. Nessa figura, nota-se que a média suavizada dessa série não teve grandes oscilações, mantendo entre 290 e 287 Kelvins ao longo do tempo. As únicas variações significativas dessa curva podem ser observadas durante o ciclo solar 19, onde ela apresenta um pequeno pico, e durante o ciclo 22, onde se observa uma tênue depressão. Os máximos anuais dessa série estiveram entre 291 e 295, enquanto que os mínimos, entre 280 e 285. O maior valor registrado ocorreu no ciclo solar 21, enquanto que o menor valor, no ciclo 19.

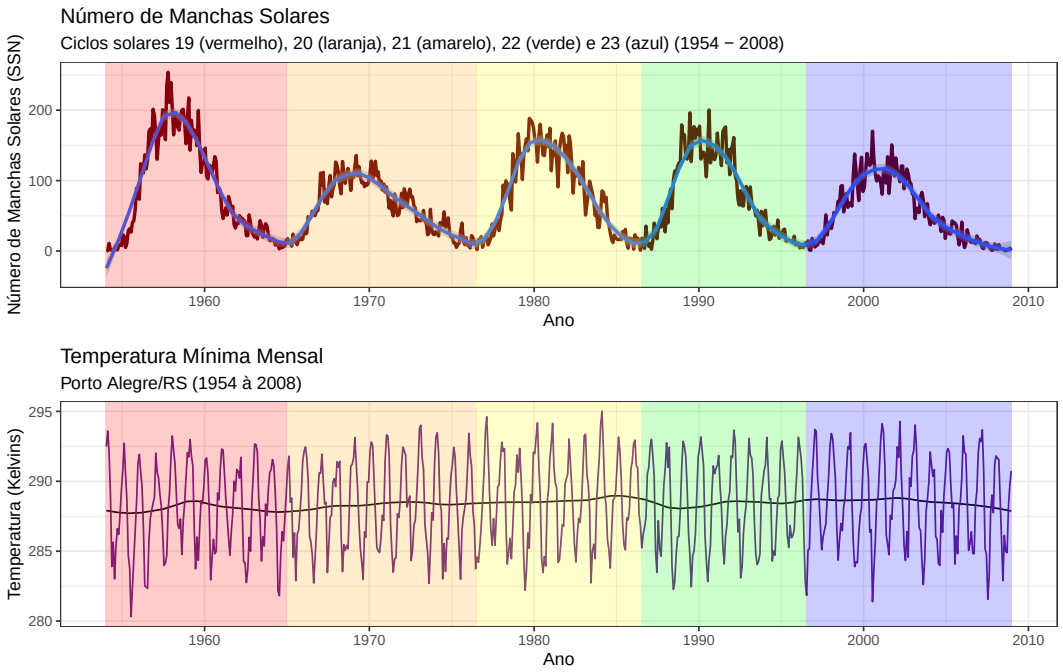


Figura 82 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Porto Alegre/RS

Após coletar e reconstruir a série temporal relativa à temperatura superficial mínima em Porto Alegre, para uma periodicidade de 64 meses, observou-se que a reconstituição dessa série possui uma elevada amplitude variacional nos ciclos 19, 22 e 23, Durante os ciclos 20 e 21, foi observado uma baixa potência Wavelet, o que pode ser visto pela baixa amplitude da curva. Essa reconstituição mostrou-se contínua e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. Além disso, nos ciclos solares 19 e 20, as duas reconstituições variam aproximadamente em fase, enquanto que, nos ciclos seguintes, nota-se que elas variam fora de fase, conforme mostrado na figura 83.

Ao reconstituir essa série para a escala de período de 128 meses, observou-se uma descontinuidade entre os ciclos solares 22 e 23, mesmo utilizando um nível de significância de 0,99. A maior amplitude variacional da reconstituição pôde ser observada no ciclo solar 19. Nos ciclos seguintes, é notório uma diminuição gradativa na extensão variacional dessa reconstrução. Nos ciclos 19 e 20, percebe-se que as duas reconstituições mostradas na figura 84 variam aproximadamente em fase. Nos ciclos seguintes, nota-se que elas variam em oposição de fase.

Conforme mostrado na figura 85, a reconstrução dessa série para uma escala de período de 256 só se mostra possível após o ciclo solar 20, mesmo utilizando um nível de significância de 0,99. Após esse ciclo, percebe-se que ambas as reconstituições variam em fase, e que aquela referente a temperatura superficial mínima possui uma amplitude constante.

Por fim, aplicando a Análise de Coerência Wavelet entre essa série e os Índices de

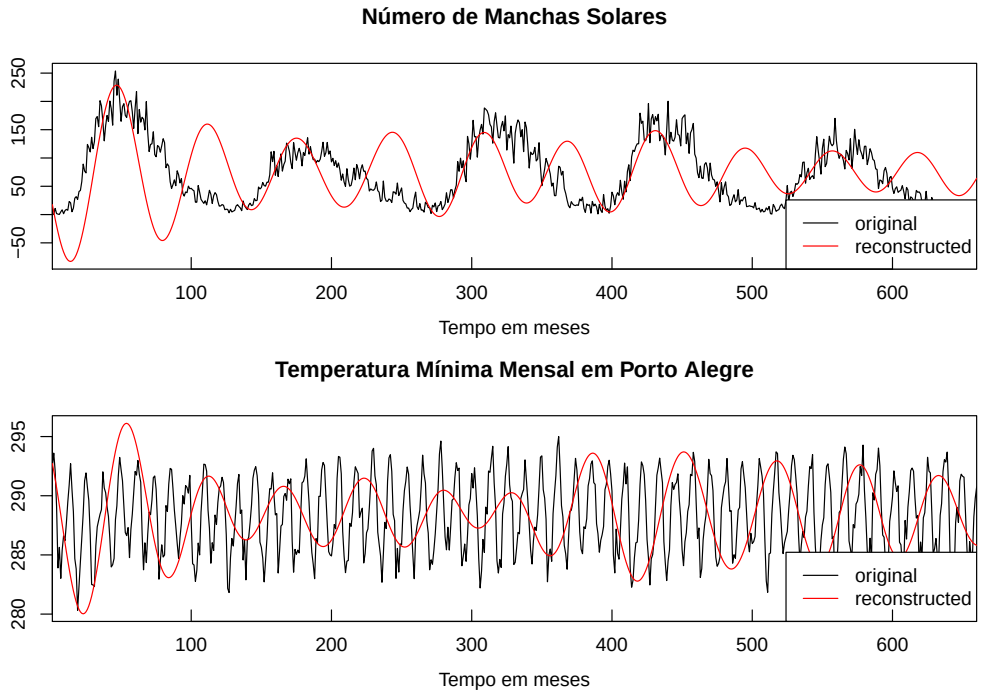


Figura 83 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

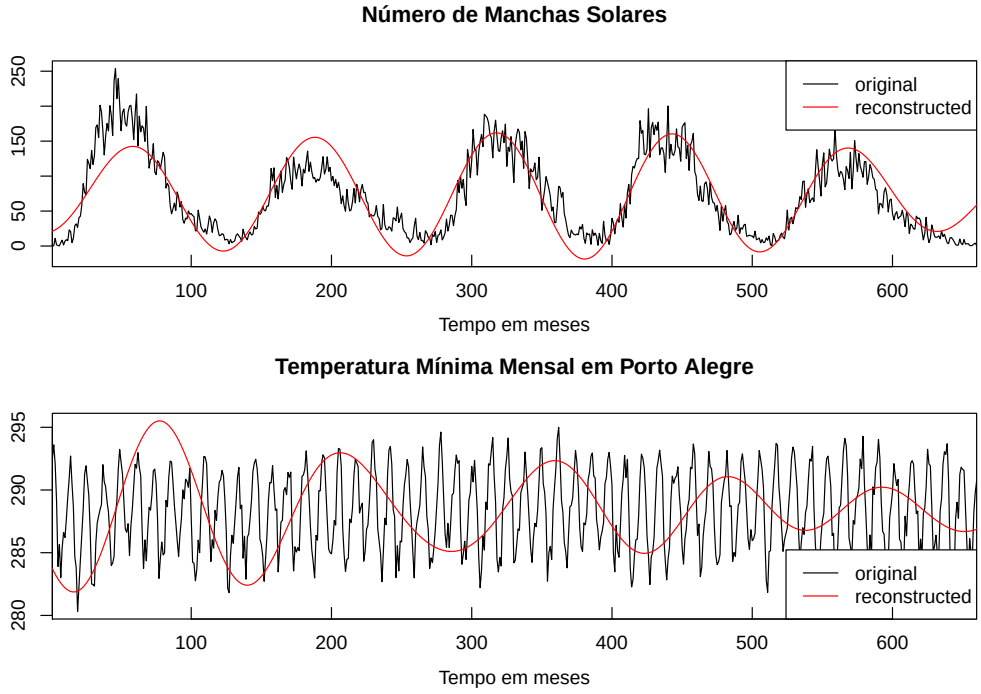


Figura 84 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Atividade Solar, percebe-se que, na relação Emissão Solar F10.7 x Temperatura mínima, observa-se nível de coerência superior a 0,7, para a periodicidade próxima a dois ciclos solares. O mesmo não se observa na relação Número de Manchas Solares x Temperatura

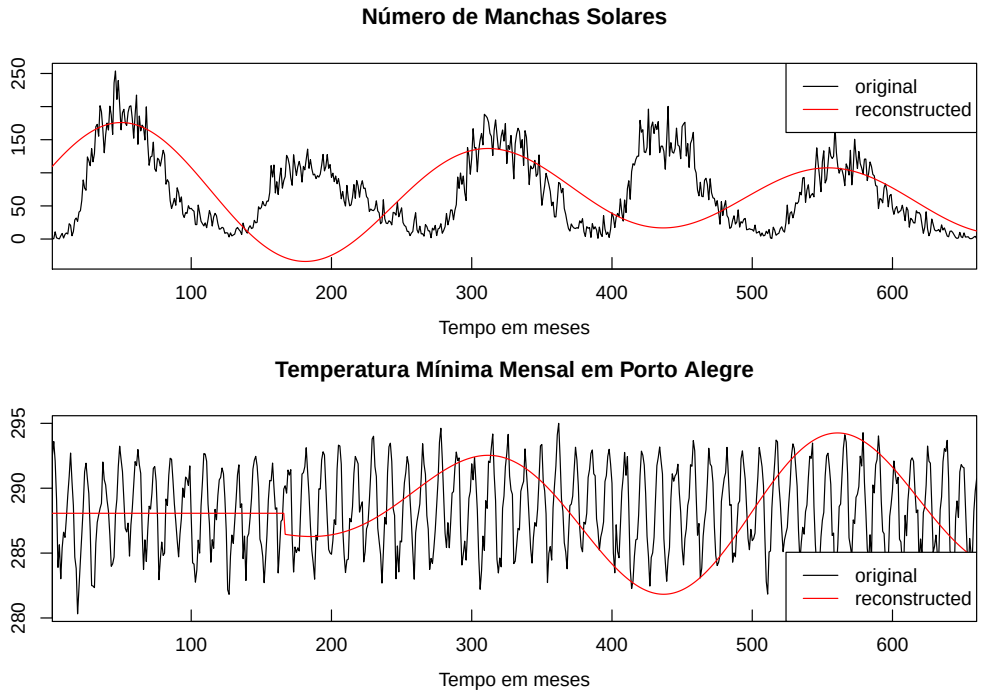


Figura 85 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Mínima. Para a escala de período de 128 meses nota-se que o nível de coerência espectral, nas duas relações manteve-se acima 0,7 durante todo o tempo, havendo momentos, inclusive, onde nível de coerência espetral atingiu valores próximos a 1, como por exemplo, entre o mês 1 e o 300. Quanto a diferença angular de fase, nessa periodicidade, a predominância de setas voltadas para cima apontam para valores próximos a 90º.

4.4.4 Rio de Janeiro

Por fim, a figura 87 mostra a variação da temperatura superficial mínima na cidade do Rio de Janeiro/RJ. Diferentemente dos outros casos, a média suavizada desses dados apresentam um perfil mais variável, onde é possível perceber oscilações significativas durante os ciclos 19, 20 e 21. Essa média manteve-se próxima a 291 Kelvins ao longo do tempo. Em relação aos máximos anuais, é possível perceber um perfil aparentemente ondulatório ao se sequenciar tais pontos, os quais seguem uma sequencia de aumento e diminuição. Já para os mínimos sazonais, se percebe um perfil mais aleatório. O maior valor dessa série foi registrado durante o início do ciclo solar 23, enquanto que o menor valor, no término do ciclo 19.

Reconstruindo a série temporal relativa à temperatura superficial mínima na cidade do Rio de Janeiro, para uma periodicidade de 64 meses, obteve-se uma curva contínua e diferenciável ao longo de todo o seu domínio, utilizando nível de significância

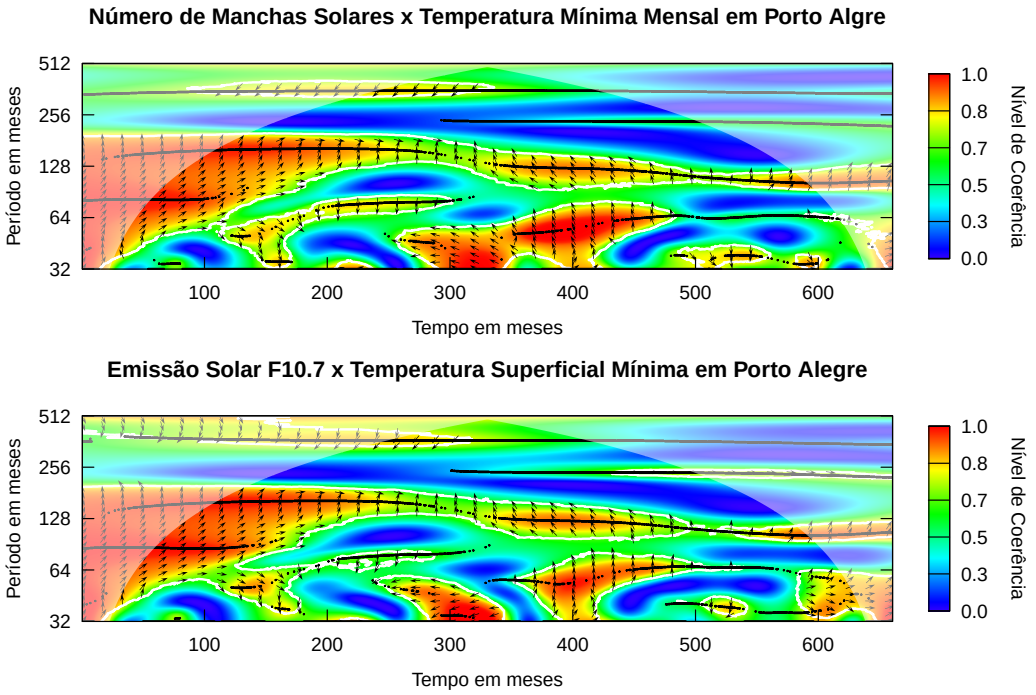


Figura 86 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

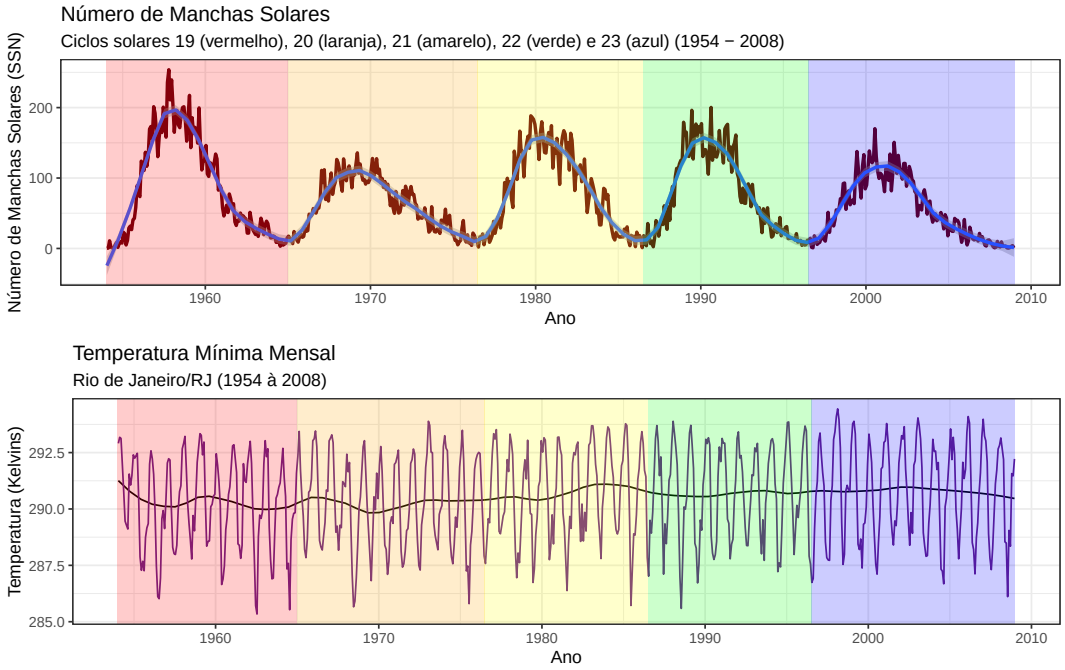


Figura 87 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Temperatura Superficial Mínima em Rio de Janeiro/RJ

de 0,99. conforme mostrado na figura 88. Nessa reconstituição, observou-se que as maiores amplitudes variacionais da curva ocorreram nos ciclos 19, 20 e 21. Nos ciclos seguintes, percebeu-se uma diminuição na extensão variacional. Além disso, notou-se que no ciclo 19, as duas reconstituições mostradas nessa figura variaram em fase, ao passo que, nos demais ciclos, elas variaram fora de fase.

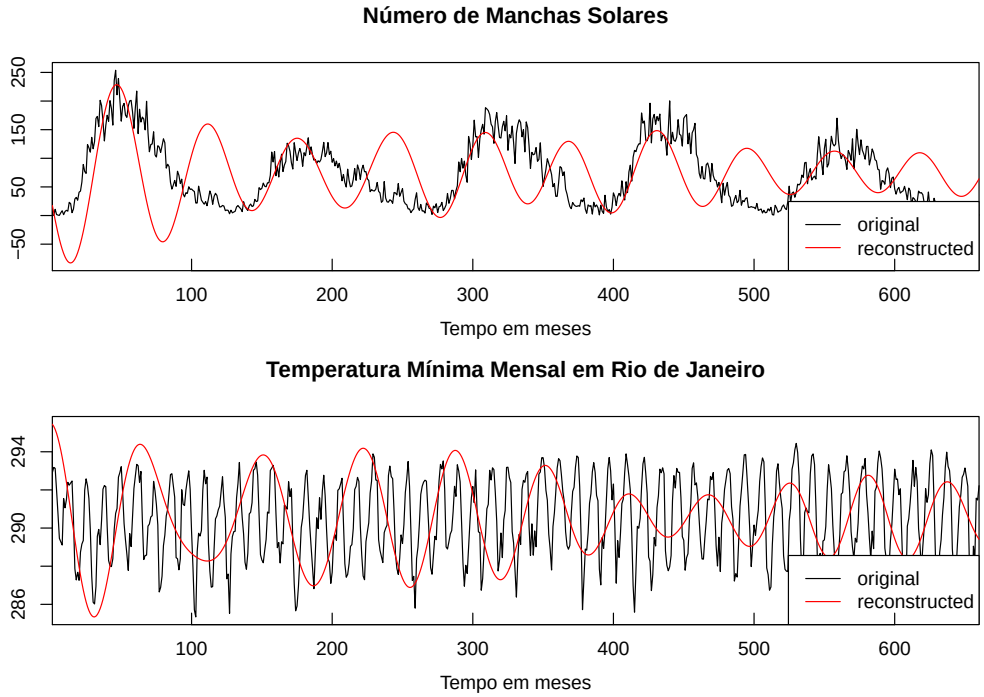


Figura 88 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a escala de período de 128 meses, a reconstituição dessa série também mostrou-se contínua e diferenciável ao longo de todo o seu domínio, conforme mostrado na figura 89. Comparando as duas reconstituições mostradas nesse gráfico, nota-se que elas estão defasadas em aproximadamente 180º. Quanto a amplitude variacional, é possível perceber um perfil simétrico da curva em torno do fim do ciclo solar 21, onde se observa a extensão variacional máxima. Nos pontos adjacentes a esse máximo, é notável uma diminuição progressiva da amplitude, para ambos os lados.

Para a escala de período de 256, a figura 90 mostra que a reconstituição desse série também possui um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. Quanto a amplitude variacional da curva, percebe-se que nos ciclos 19 e 20, o seu valor foi pequeno, denotando assim que para esses ciclos, a Potência Wavelet foi baixa, semelhantemente aos casos anteriores. Nos demais ciclos, já se observa uma amplitude mais significativa. Comparando as duas reconstituições, nota-se que elas variam em fase, durante todo o tempo.

Por fim, na figura 91 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre as séries relativas aos índices de atividade solar e a temperatura superficial mínima na cidade do Rio de Janeiro. Para a periodicidade de 512 meses, observa-se níveis de coerência espectral superior a 0,8, durante os ciclos solares 19, 20, 21 e 22 (i.e entre o mês 1 e o 500 da série) na relação Emissão Solar F10.7/Temperatura Superficial Mínima. Nesses ciclos, as setas voltadas para frente indicam que as séries estão em fase, para essa escala de período. Para

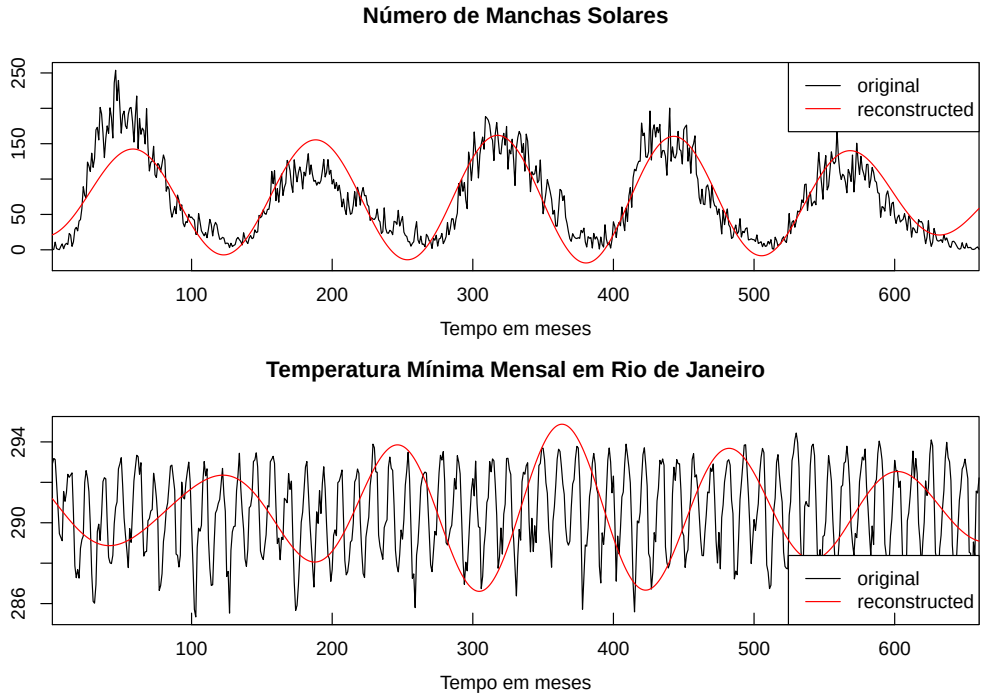


Figura 89 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

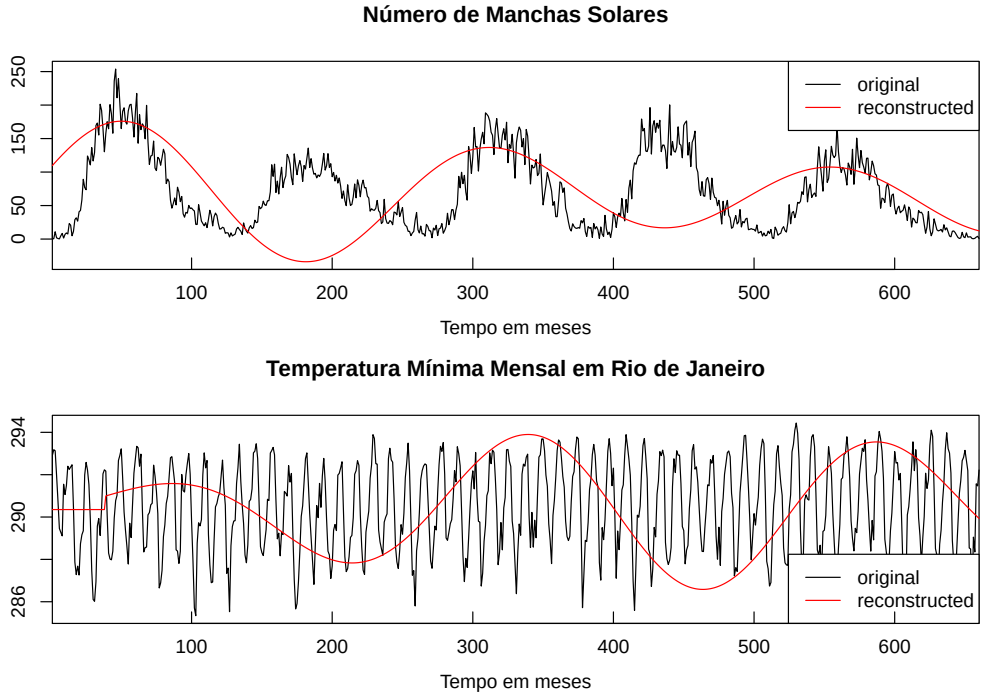


Figura 90 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

períodos de 128 meses, observa-se níveis de coerência próximos a 1 após o início do ciclo 21, ou seja, após o mês 250. Nesse intervalo, as setas apontam para uma diferença angular de fase entre 90º e 180º. Além disso, também é possível notar a presença de regiões de

nível de coerência próximos a 1 para o espectro de períodos entre 64 e 32 meses, como durante os ciclos solares 19 e 21.

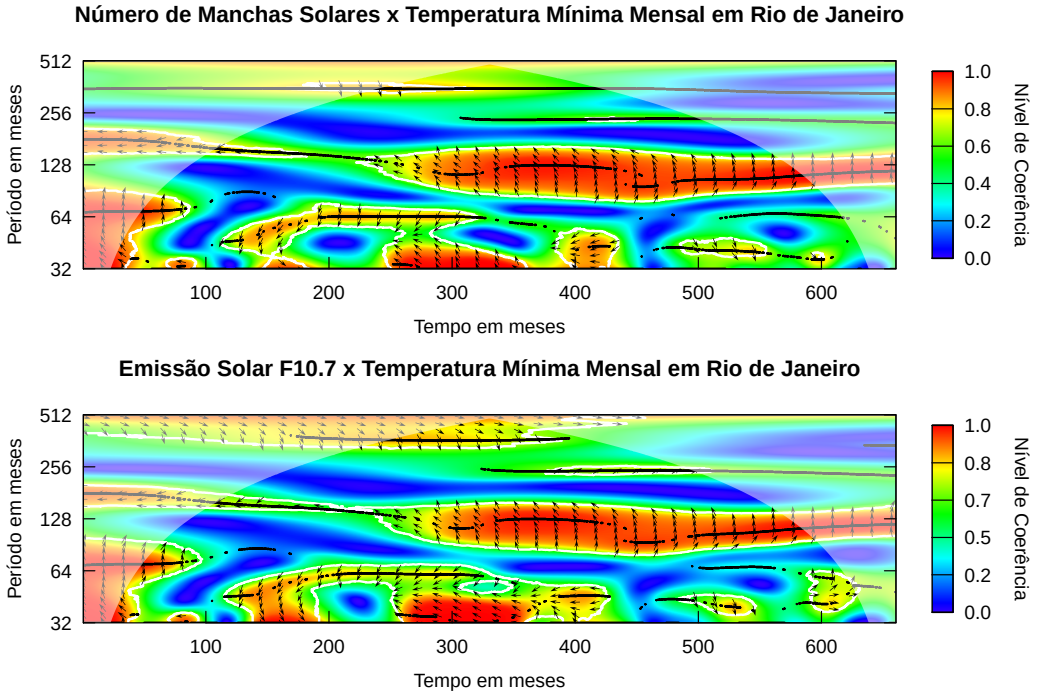


Figura 91 – Análises de Coerência Wavelet entre a temperatura superficial mínima em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

4.5 Umidade Relativa do Ar

4.5.1 Campo Grande

Os dados relativos à Umidade Relativa do Ar média mensal podem ser visualizado na figura 92. Primeiro ponto a ser destacado nesse gráfico é a significativa variação da média suavizada dos dados ao longo dos ciclos solares. Durante os ciclo solar 19, nota-se que essa média diminui de 80% para 70%, retornando para esse patamar após o término do ciclo solar 20. Nos demais ciclos, percebe-se um perfil mais constante dessa média, a qual oscila próximo a 80%, tendo apenas um pequeno durante o máximo do ciclo 21. Além disso, comparando os dois gráficos, percebe-se que as estações mais secas ocorreram durante os ciclos solares 19 e 20.

Conforme mostrado na figura 93, a reconstituição dos dados relativos a Umidade Relativa do Ar mensal para a cidade de Campo Grande, para a escala de período de 64 meses, apresenta uma descontinuidade entre os ciclos solares 22 e 23. Durante quase todo o tempo, percebe-se que as duas reconstituições mostradas nessa figura encontram-se

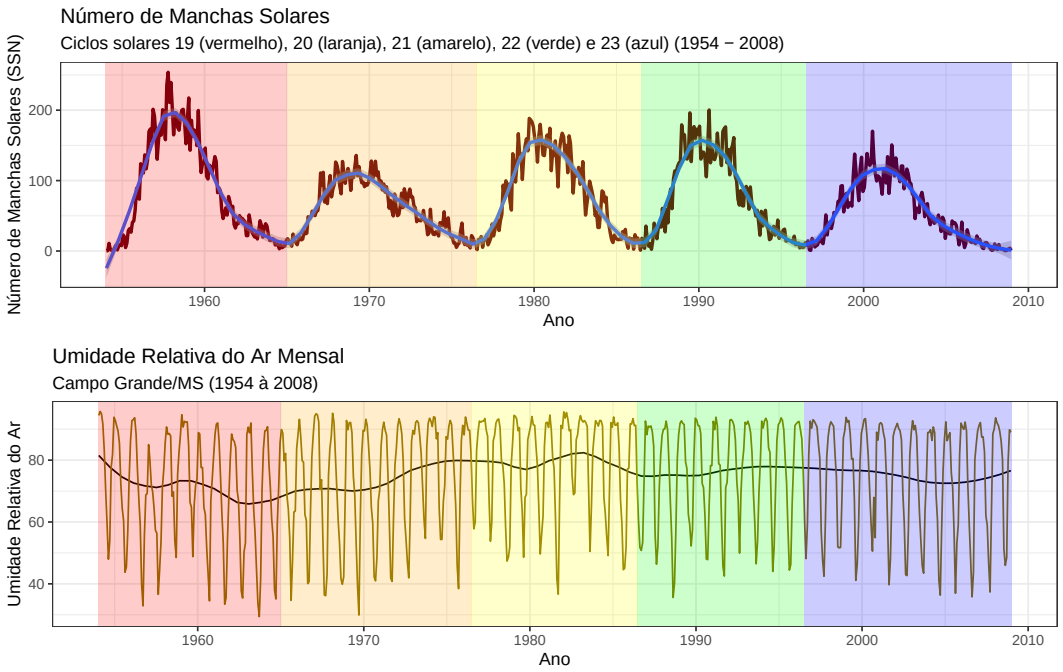


Figura 92 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande/MS

em oposição de fase, indicando assim para uma possível correlação negativa para essa periodicidade. Quanto a Potência Wavelet, denotada pela amplitude da curva, nota-se que os maiores valores podem ser observados durante o ciclo solar 19, e na fase de declínio do ciclo solar 21.

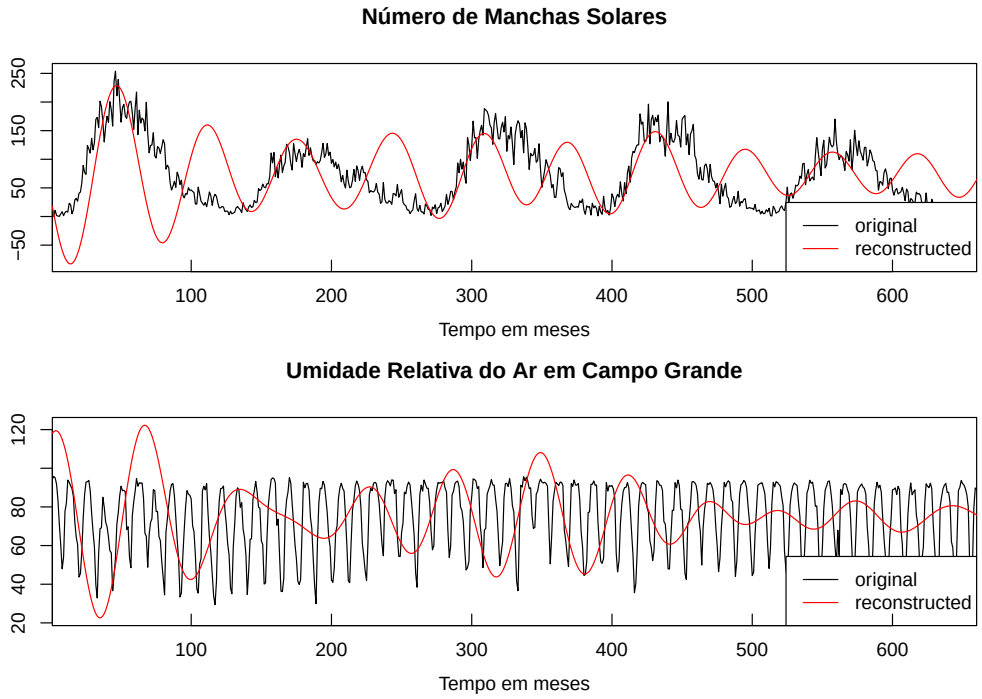


Figura 93 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a escala de período de 128 meses, a figura 94 mostra que a reconstituição dessa série relativa a Umidade do Ar só foi viável somente nos ciclos solares 20, 21 e 22, onde é possível perceber uma diferença de fase entre as curvas próxima a 180º. Em relação à amplitude variacional, observa-se um valor relativamente alto para o período equivalente ao ciclo solar 21, e um valor mais baixo nos demais ciclos.

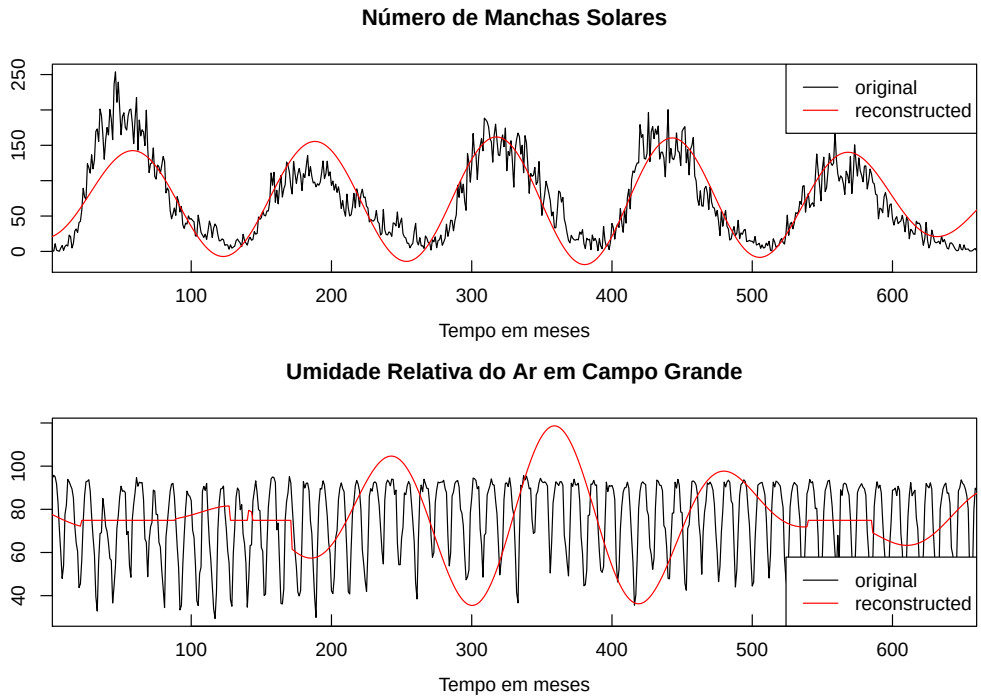


Figura 94 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Já para a escala de período de 256, a reconstituição dessa série temporal apresenta um comportamento contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio, para um nível de significância de 0,7, conforme exposto na figura 95. Essa reconstrução apresenta-se defasada em aproximadamente 90º em relação àquela relativa ao Número de Manchas Solares, mostrada na parte superior dessa figura. Quanto a amplitude variacional, é possível perceber uma pequena diminuição em sua magnitude somente nos dois últimos ciclos da série.

Por fim, na figura 96 tem-se o resultado das Análises de Coerência Wavelet entre essa série temporal e aquelas relativa aos índices de atividade solar. Para as escalas de período de 512 e 256, percebe-se níveis de coerência espectral superior a 0,8 durante os ciclos 19, 20, 21 e 22 na relação Número de Manchas Solares/Umidade Relativa. Já na relação Emissão Solar F10.7/Umidade relativa, percebe-se esse nível de coerência manteve-se acima de 0,8 durante quase todo o tempo. Nas duas relações citadas, a predominância de setas voltadas para baixo indica uma diferença angular de fase próxima a 270º.

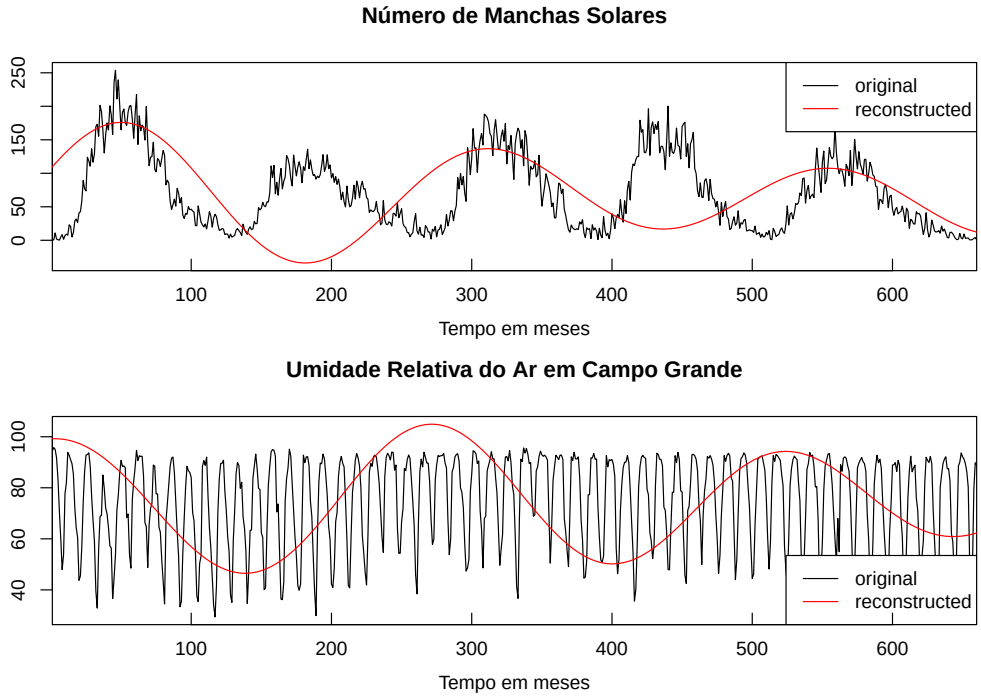


Figura 95 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

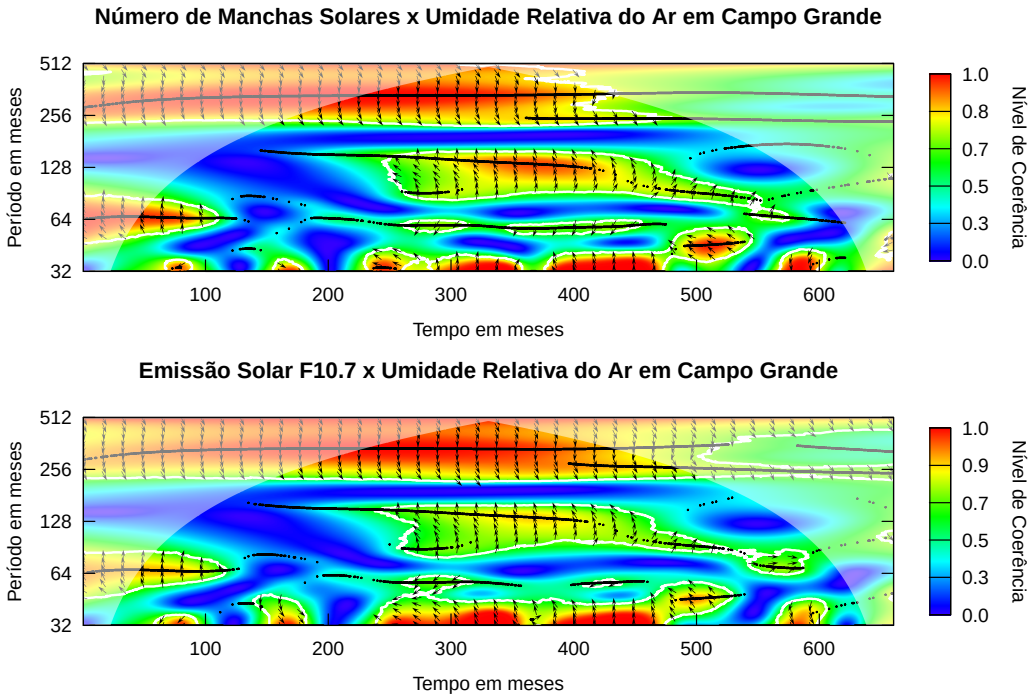


Figura 96 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Campo Grande e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

Para a periodicidade de 128 meses, os painéis mostrados na figura 96 indicam níveis de coerência espectral entre as séries superior a 0,7 durante os ciclos 21 e 22. Na relação Número de Manchas Solares/Umidade Relativa, observa-se um nível de coerência

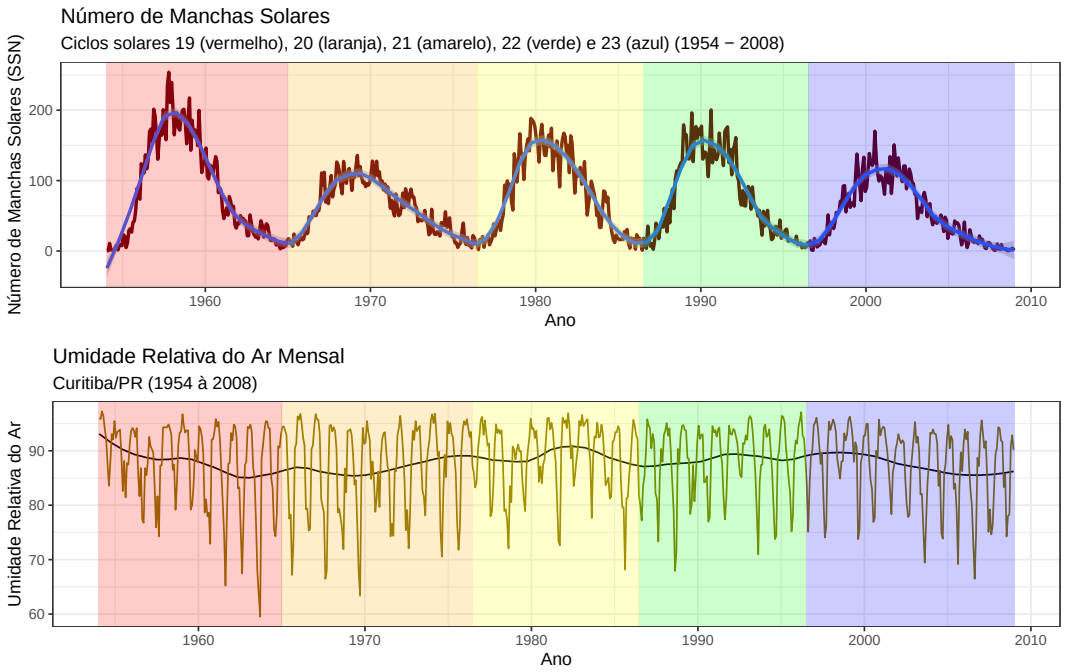


Figura 97 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba/PR

próximo a 1 durante o ciclo solar 21. Em ambos os casos, as setas voltadas para cima apontam para uma diferença angular de fase próxima a 90º para essa periodicidade e nesses ciclos. Para a periodicidade de 64 meses, é possível observar níveis de coerência espectral entre as séries superiores a 0,8 durante o ciclo 19, enquanto que, para a escala de período de 32 meses, observa-se níveis de coerência próximos a 1 durante os ciclos 19, 20 e 21.

4.5.2 Curitiba

Na figura 97 tem-se a variação mensal da umidade relativa do ar em Curitiba/PR. Comparando ambos os painéis mostrados nessa figura, percebe-se que as estações mais secas ocorreram durante as baixas atividades solares, como por exemplo, durante a transição do ciclo 19 para o 20, onde se observou o valor mais baixo de toda a série. A média suavizada também apresenta um comportamento bastante variável ao longo da série. Durante o ciclo 19, nota-se que ela diminui de 94% para 86%, mantendo-se nesse patamar durante uma boa parte do ciclo 20, e tornando a aumentar para valores mais próximos a 90% após o ciclo 21. Nos demais ciclos, já se percebe um perfil aproximadamente constante dessa curva, a qual apresenta poucas variações.

A figura 98 mostra os dados relativos a Umidade Relativa do Ar média mensal para a cidade de Curitiba, assim como a sua reconstituição para a periodicidade de 64 meses, ou meio ciclo solar, a qual se mostra contínua e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. Comparando as duas reconstruções apresentadas nessa figura, nota-se que

durante quase todos os ciclos solar, elas se mostram defasadas em 180º, em outras palavras, em oposição de fase. Quanto a Potência Wavelet, a amplitude variacional mostra valores elevados no ciclo solar 19, níveis moderados nos ciclos 21 e 22, e valores mais baixos nos ciclos 20 e 23;

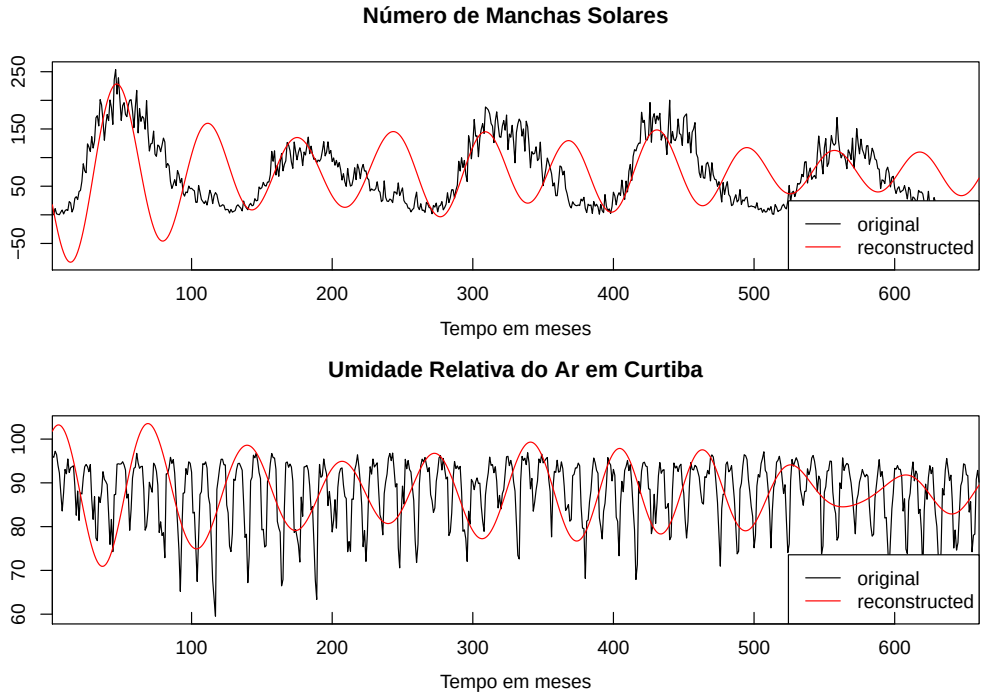


Figura 98 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Reconstruindo essa série para a periodicidade de 128 meses, observa-se uma curva contínua e diferenciável ao longo de todo seu domínio, conforme mostrado na figura 99. Nos ciclos 19, 20 e 21, é possível perceber uma oposição de fase entre as curvas, enquanto que , nos ciclos 22 e 23, percebe-se que elas passam a variam em fase. Quanto a amplitude variacional da curva, percebe-se um comportamento não uniforme, havendo instantes onde ela possui valores mais altos, os quais são seguidos de níveis mais baixos.

Na figura 100 tem-se a reconstituição dessa série para a escala de período de 256, a qual possui amplitude constante e comportamento contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio. Comparando as reconstituições mostradas nessa figura, percebe-se que elas variam com uma diferença de fase próxima a 90º

Por fim, na figura 101 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre os índices de Atividade Solar e os valores mensais referentes a Umidade Relativa do Ar em Curitiba. Para as escalas de períodos de 512 e 256 meses, percebe-se níveis de coerência superiores a 0,7 em ambas as análises, durante todo o tempo de estudo. A predominância de setas voltadas para frente indica uma correlação positiva entre as séries para essas periodicidades.

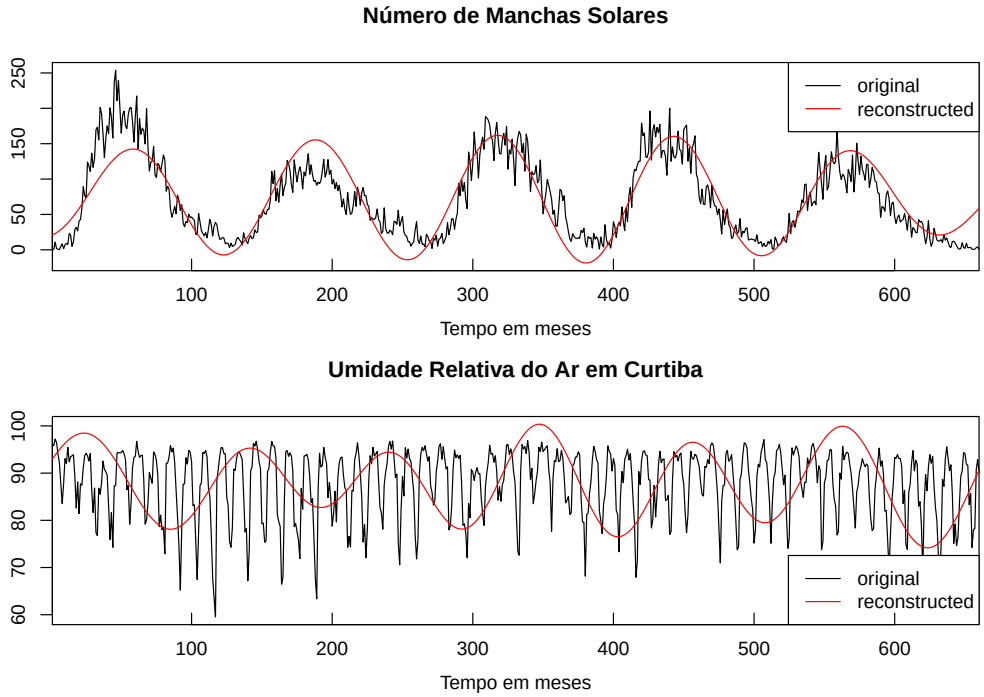


Figura 99 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

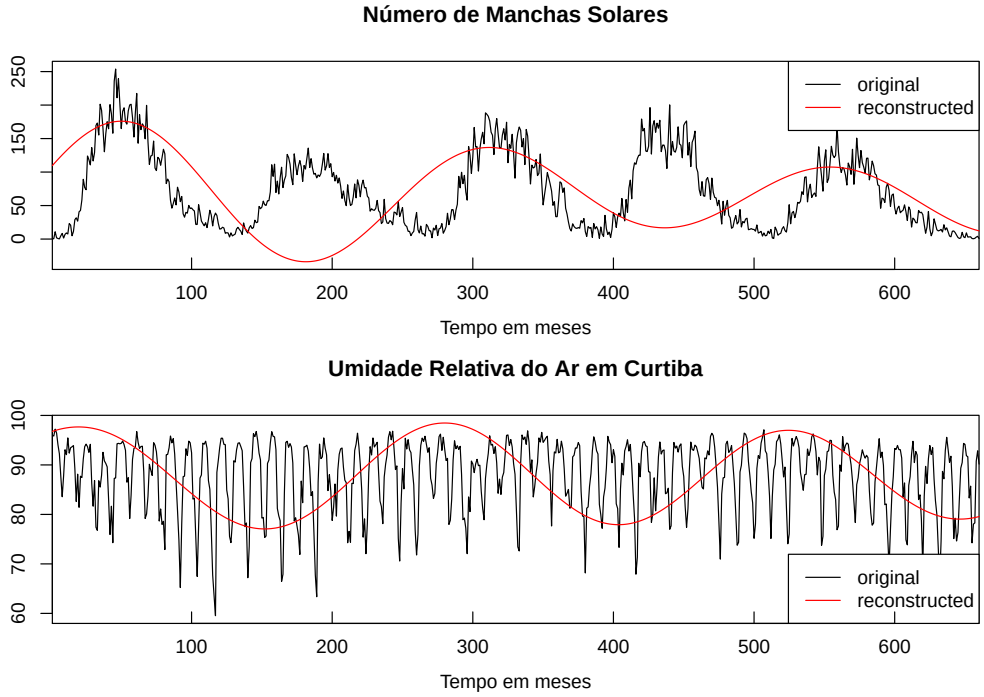


Figura 100 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Para a periodicidade de 128, os gráficos indicam níveis de coerência superior a 0,7 nas duas relações durante os ciclos solares 21, 22 e 23, isto é, após o mês 250. Também é possível perceber um alto nível de coerência durante o ciclo solar 19, para essa escala

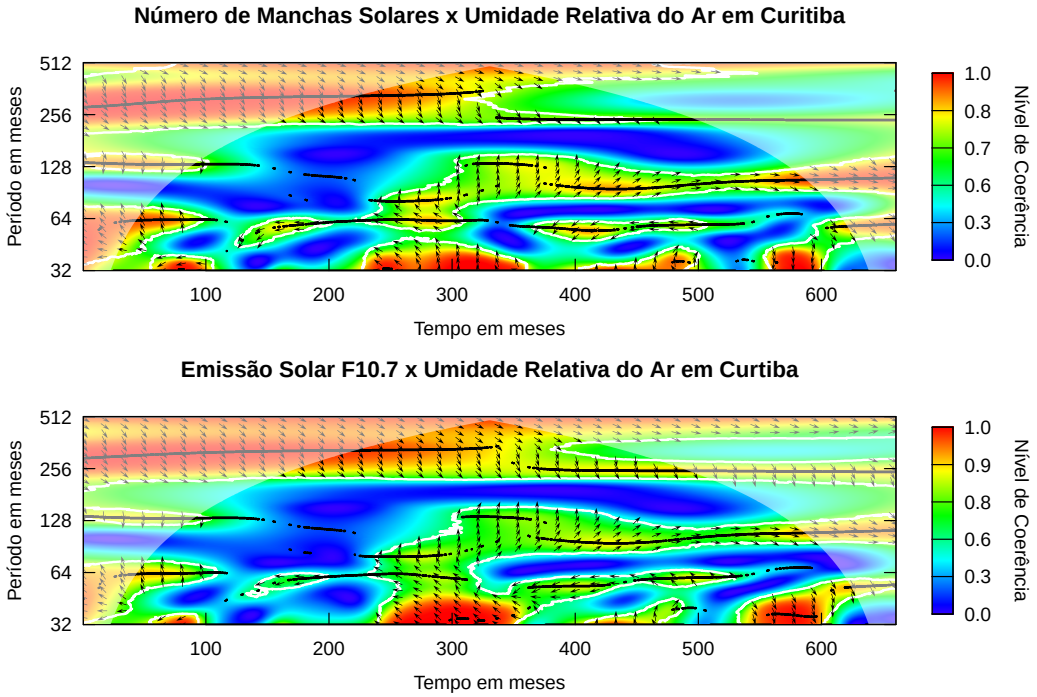


Figura 101 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

de período, contudo, uma vez que esse intervalo encontra-se fora do cone de influência, exigi-se análises mais cautelosas. Quanto a diferença angular de fase, as setas indicam valores mais próximo a 90º no ciclo solar 21, e valores mais próximos a zero, nos ciclos seguintes. Já para as periodicidades entre 64 e 32 meses, é possível ver níveis de coerência próximos a 1 nos ciclos 19, 21 e 23.

4.5.3 Porto Alegre

Conforme exposto na figura 102, a variação mensal da umidade relativa do ar em Porto Alegre obedece a mais de um padrão de variação, o que pode ser notado tanto pelos dados reais, quanto pela média suavizada, a qual oscila entre 90% e 87%. Durante os ciclos 19 e 20, percebe-se que essa média sofre uma diminuição de 89% para 87%, permanecendo nesse patamar até o início do ciclo 21. Após esse ponto, percebe-se dois picos nessa curva, um durante o máximo do ciclo 21 e outro bem acentuado na transição do ciclo 22 para o 23, onde inclusive, se observa um aumento significativo na curva relativa aos dados reais. Tal padrão observado logo após o ano de 1990 sugere uma possível anti-correlação entre as duas medidas mostradas nessa figura.

Aplicando a reconstituição dessa série, para a escala de período de 64, observa-se uma oposição de fase entre essa série e aquela relativa ao Número de Manchas Solares nos ciclos 20 à 23, conforme mostrado na figura 103. No ciclo 19, observa-se uma relação

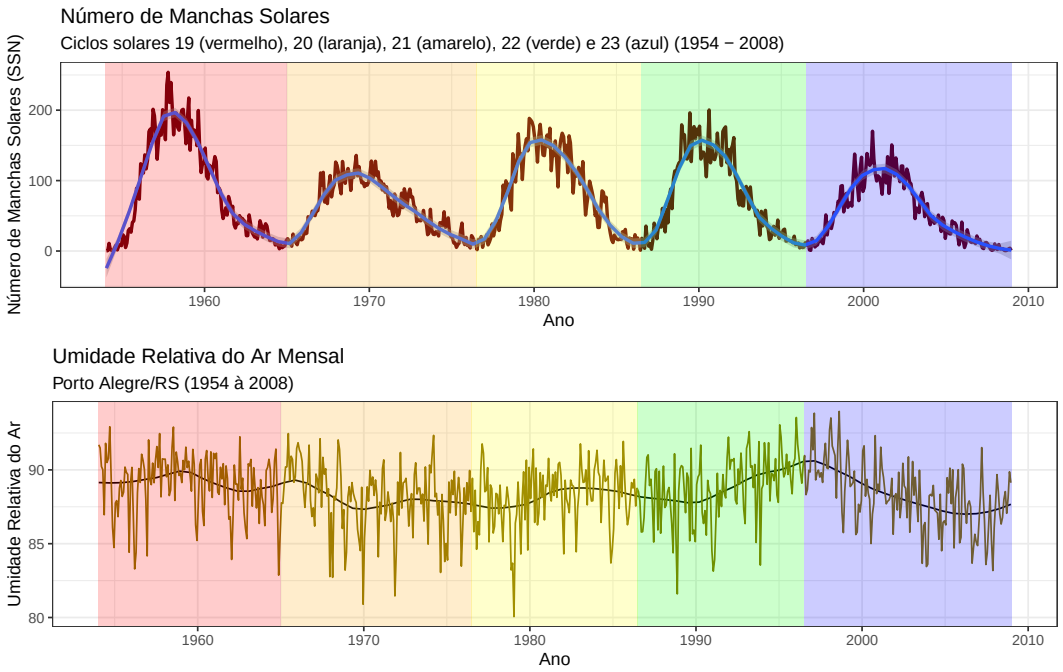


Figura 102 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre/PA

positiva entre as duas reconstruções. Quanto a amplitude variacional, observa-se que ela segue um perfil aproximadamente uniforme ao longo do tempo, tendo poucas variações ao longo do tempo.

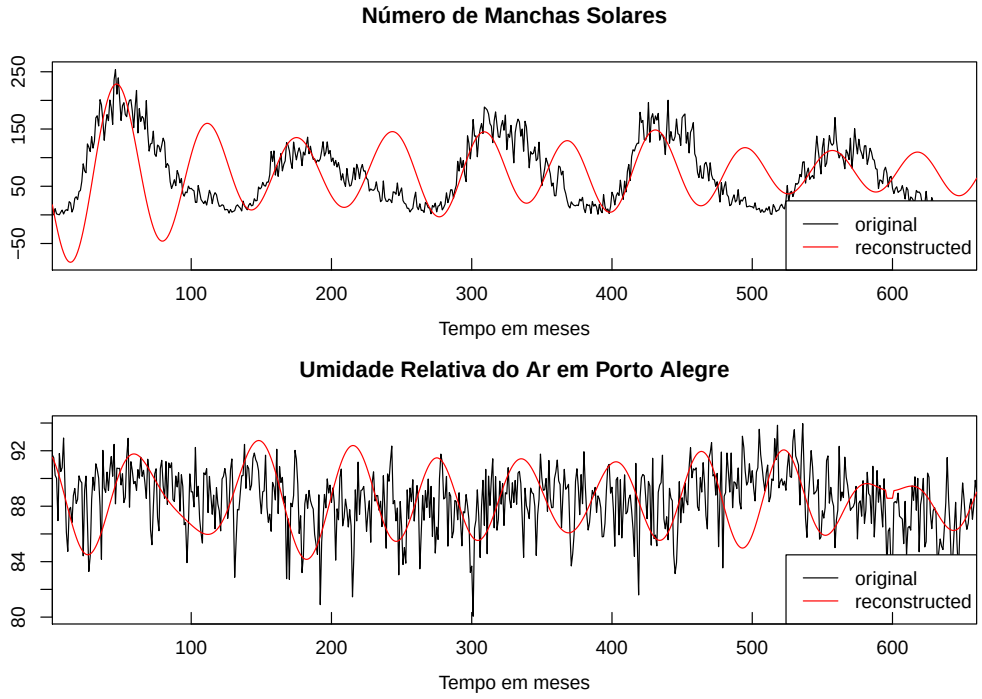


Figura 103 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a periodicidade de 128, a reconstrução dessa série passa a apresentar am-

plitudes variáveis ao longo do tempo, pois, enquanto que nos ciclos 19 e 20 observa-se pequenas extensões variacionais, nos demais, nota-se valores maiores, conforme mostrado na figura 104. Quanto a diferença de fase entre as duas reconstituições, percebe-se valores próximos a 0 durante o ciclo 19, e valores mais próximos a 180º nos demais ciclos.

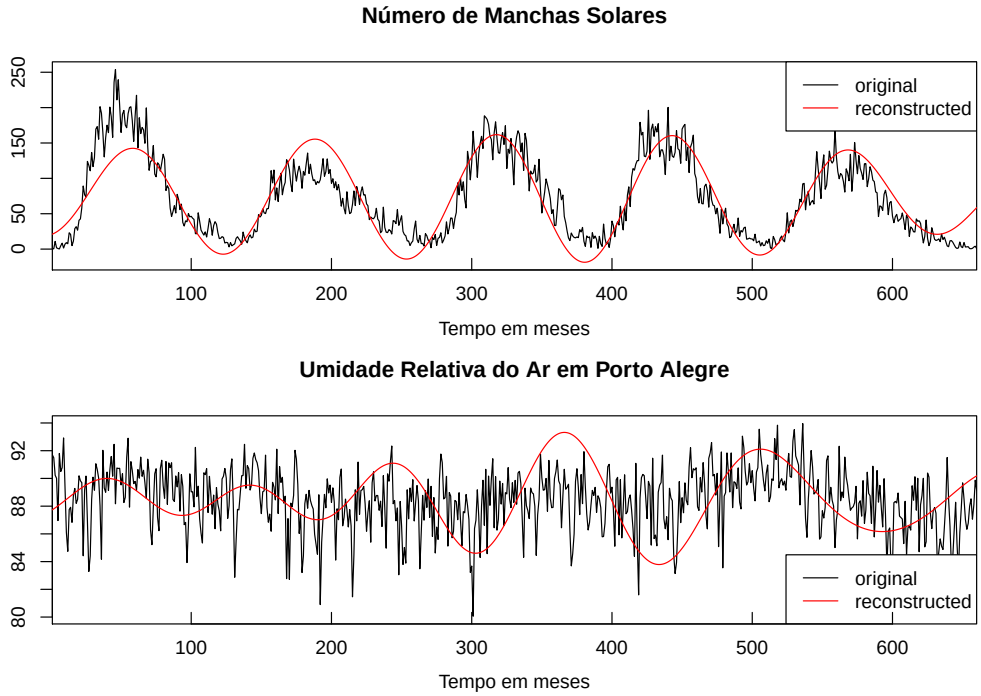


Figura 104 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Já para a periodicidade de 256 meses, observa-se que as duas reconstruções mostradas na figura 105 variam em fase durante todo o período de estudo. Quanto a amplitude, observa-se valores pequenos nos ciclos 19 à 22, e um valor maior no ciclo 23.

Por fim, na figura 106 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre os índices de atividade solar e a umidade relativa do ar em Porto Alegre. Nas duas relações mostradas nesses gráficos, percebe-se que, para a escala de período próxima a 44 anos, ou 512 meses, o nível de coerência espectral entre as séries esteve próximo de 1 durante todo o tempo, em uma diferença angular de fase próxima a 45º, como sugere a posição das setas nessa região. Para a periodicidade de 256 meses, observa níveis de coerência superior a 0,8 nas duas análises, durante o período do ciclo solar 19, e um ângulo de fase próximo a 0. Vale ressaltar em ambas periodicidades, tais níveis de coerência ocorreram foram do cone de influência, demandando assim, análises mais acuradas.

Para a escala de período de 128 meses, observa-se níveis de coerência espectral superiores a 0,7 entre as séries durante os ciclos solares 21 e 22. As setas presentes nessa área indicam uma diferença angular de fase entre 90º e 180º, indicando assim para uma

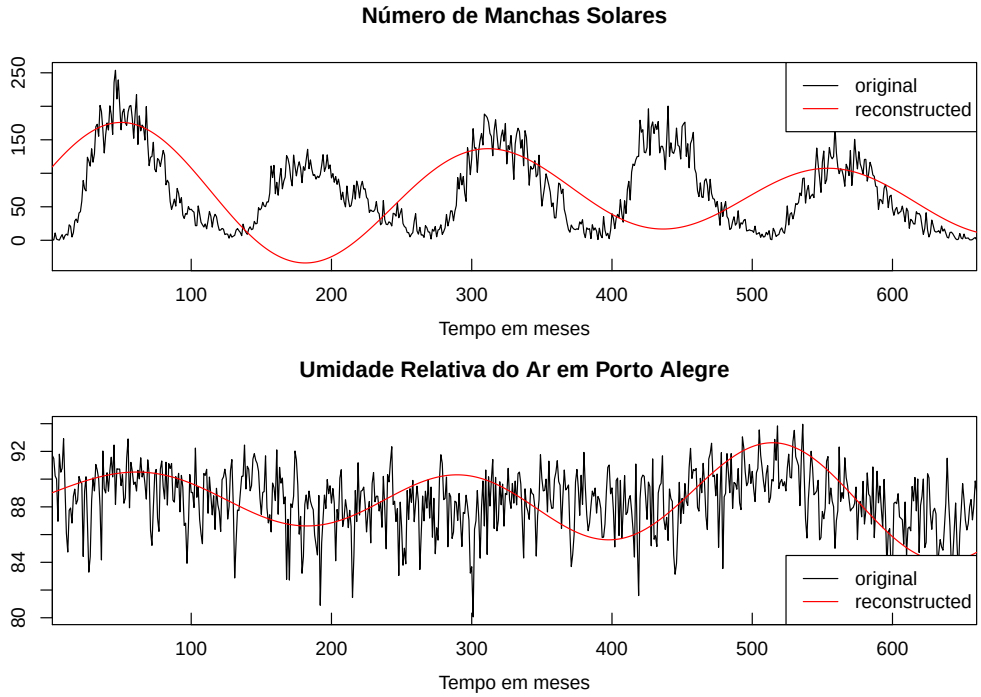


Figura 105 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

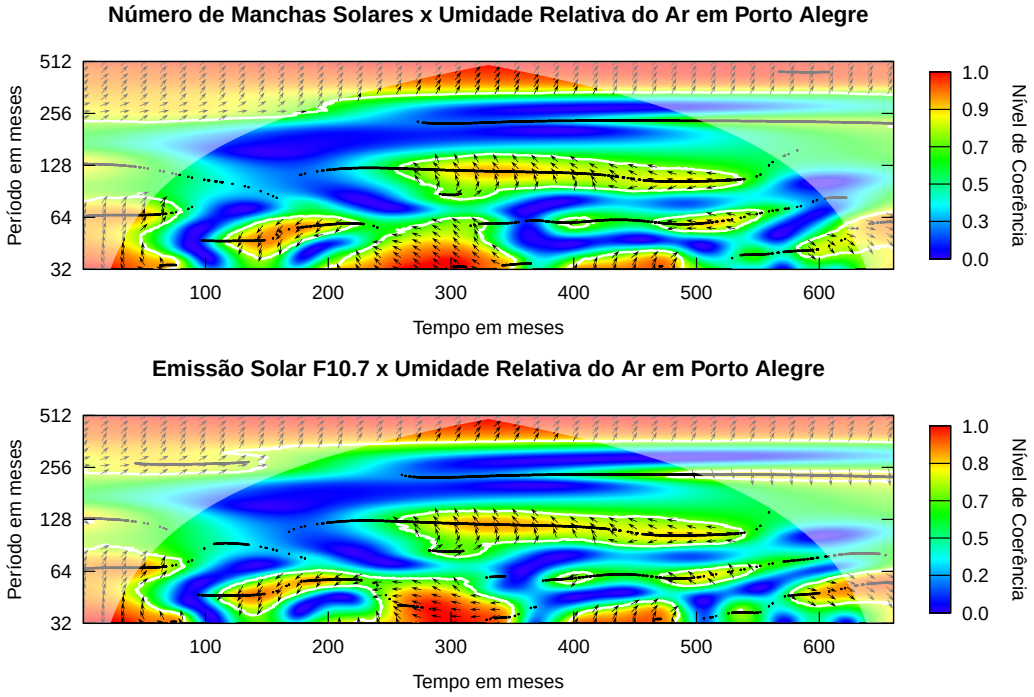


Figura 106 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Porto Alegre/RS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

correlação negativa entre os dados durante esse ciclo. Já para periodicidades entre 64 e 32 meses, observa-se níveis de coerência próximos a 1 para os intervalos entre o mês 1 e 90, entre o mês 110 e 350, próximo ao mês 400, e após o mês 600.

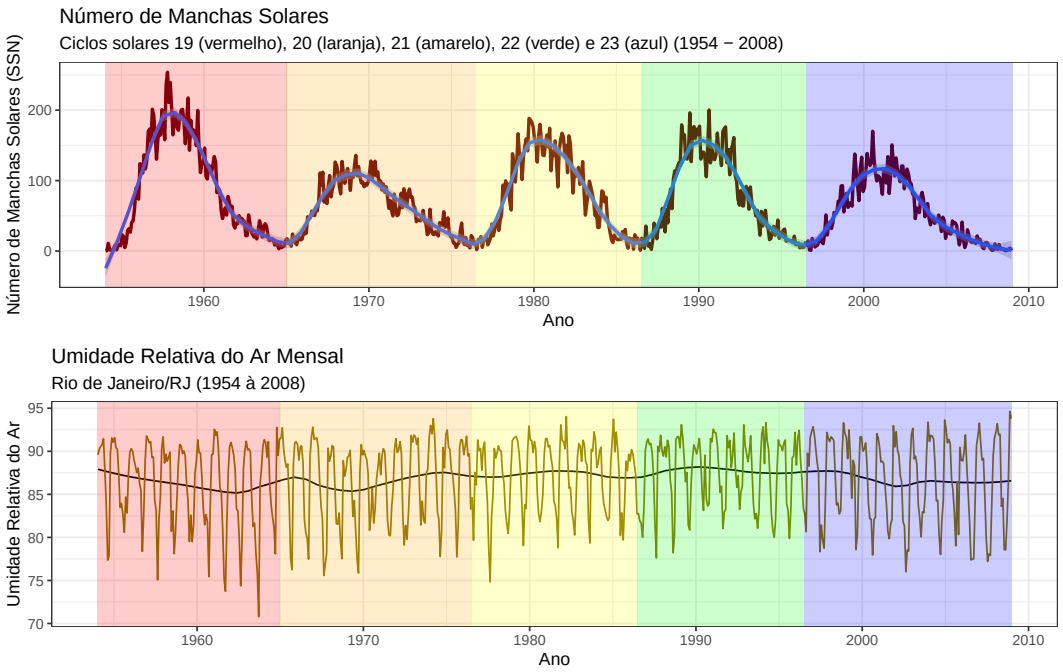


Figura 107 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro/RJ

4.5.4 Rio de Janeiro

Na figura 34 tem-se a variação mensal da umidade relativado do ar na cidade do Rio de Janeiro durante o período desse estudo. Nesse gráfico, observa-se que a variação da média suavizada ao longo do tempo ocorreu próximo a marca de $87,5\%$ tendo pequenas oscilações entre os ciclos 19 e 20. Além disso, dado a proximidade dessa cidade com o mar, os valores mensais mantiveram-se acima de 75% durante todo o tempo, com exceção de alguns meses situados na fase de declínio do ciclo 19, onde valores mais baixos puderam der observados.

Reconstituindo essa série para a escala de período de 64 meses, observa-se níveis de potência Wavelet entre os ciclos 19 e 20 e durante o ciclo 23, conforme mostra a amplitude da curva vermelha mostrada na parte inferior da figura 108. Para os demais intervalos de tempos, observa-se potências mais baixas. Comparando as duas reconstruções, percebe-se que elas encontram-se com uma defasagem próxima a 180^o durante todo o tempo.

Reconstruindo essa série para a escala de período de 128 meses, observa-se uma descontinuidade na reconstrução durante o ciclo 21. Nos ciclos 19 e 20, nota-se que as duas curvas mostradas na figura 109 variam em oposição de fase, enquanto que nos ciclos 22 e 23, elas passam a variar em fase. Quanto a amplitude, é nota-se grandes índices durante os ciclos 19 e 20, e níveis mais baixos nos ciclos 22 e 23.

Já para a periodicidade de 256 meses, a figura 110 mostra que a reconstituição da série relacionada a umidade relativa do ar possui uma amplitude constante ao longo de

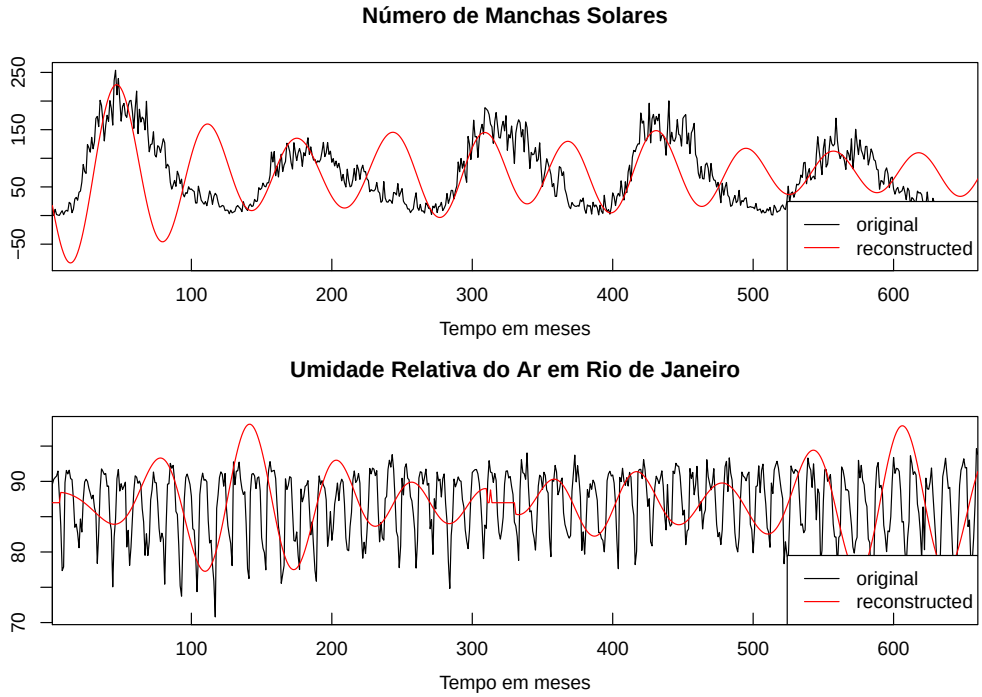


Figura 108 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

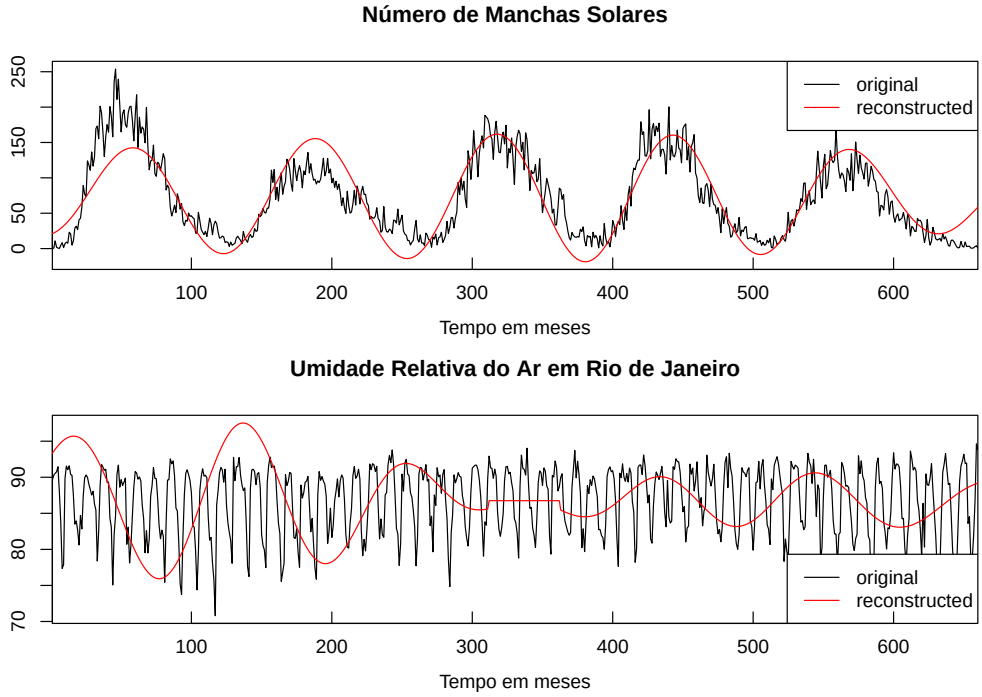


Figura 109 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

todo o tempo. Além disso, nota-se que as duas reconstituições variam com uma defasagem próxima a 90º, durante todo o tempo.

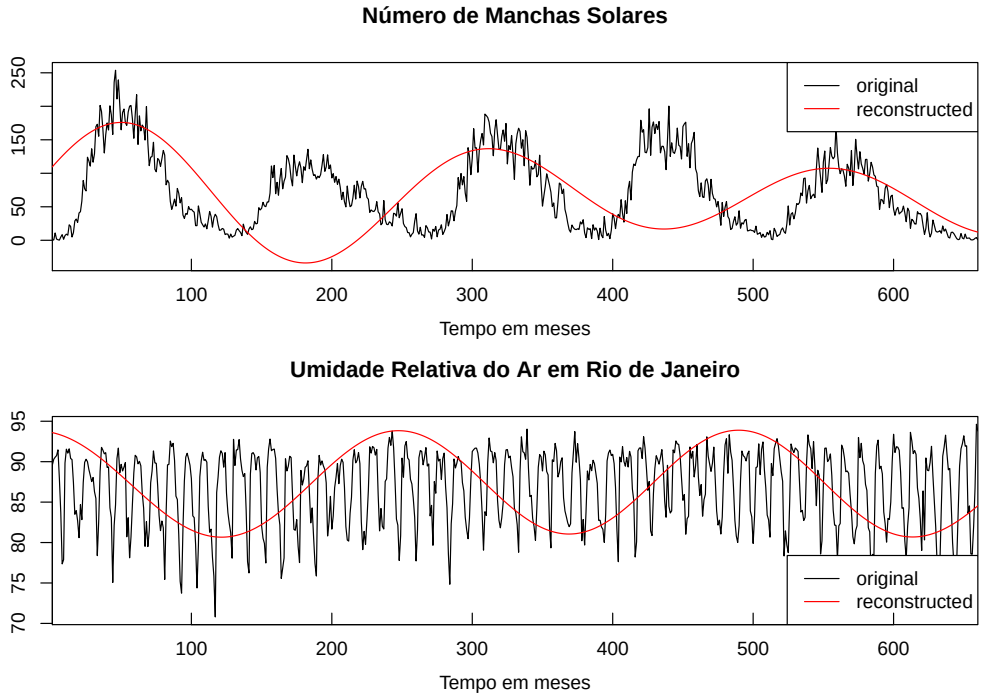


Figura 110 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Por fim, a figura 111 mostra as Análises de Coerência Wavelet entre os índices de atividade solar e a umidade relativa do ar na cidade do Rio de Janeiro. Para a escala de período de 512 meses, observa-se índices de coerência espectral próximo a 1 durante todo o tempo de estudo, com um ângulo de fase situado no quarto quadrante do círculo trigonométrico. Para a periodicidade de 256 meses, ou 22 anos, observa-se níveis de coerência próximos a 1 durante os ciclos 19 e 20, para a relação Número de Manchas/Umidade Relativa; e níveis de coerência superior a 0,7 na relação Emissão solar F10.7/Umidade Relativa, durante todo o tempo. Em ambos os casos, as setas voltadas para baixo indicam uma diferença de fase próxima a 270º.

Para a escala de período de 128 meses, nota-se níveis de coerência próximos a 1 para as duas relações entre o mês 1 e o 200, com um ângulo de fase situado no terceiro quadrante do círculo trigonométrico. Já para o período de 64 meses, percebe-se níveis de coerência elevados durante os ciclos 21 e 22, com uma diferença de fase próxima a 360º.

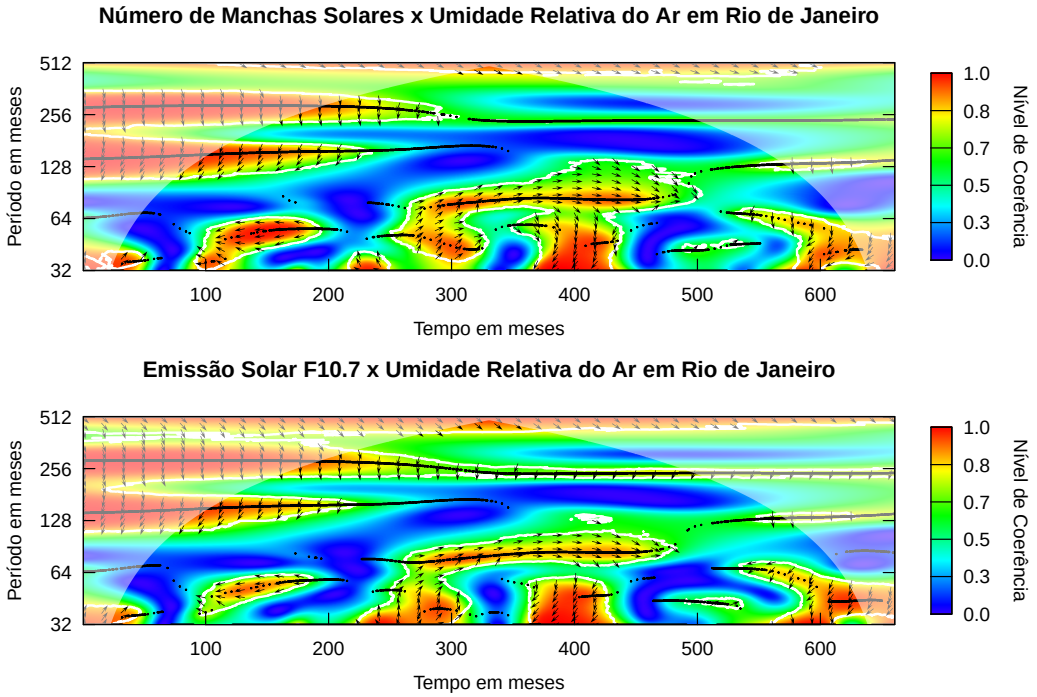


Figura 111 – Análises de Coerência Wavelet entre a Umidade Relativa do Ar em Rio de Janeiro/RJ e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

4.6 Cobertura de Nuvens

4.6.1 Campo Grande

A cobertura de nuvens média mensal observada na cidade de Campo Grande/MS pode ser vista na figura 112, onde observa-se que a média suavizada dessa série sofreu significativas oscilações ao longo do tempo, entre 45% e 60%. Durante o ciclo solar 19, percebe-se uma diminuição no valor dessa média, a qual diminuiu para valores abaixo de 50%. Tais índices se mantiveram nesse nível entre o fim do ciclo solar 19 e a primeira metade do 20. Durante a fase de declínio do ciclo 20 e durante o ciclo 21, observa-se que essa média passa por dois picos de 55% e 59%, aproximadamente. Já nos ciclos solares 22 e 23, nota-se poucas variações nessa média, a qual teve um pequeno aumento, entre 1986 e 2001, seguido de uma tênue depressão durante a segunda metade do ciclo 23. Quanto aos máximos sazonais, nota-se que eles sofreram variações mais significativas nos ciclos 19 e 20, e oscilações mais leves nos demais ciclos. Em relação aos mínimos, percebe-se um comportamento mais aleatório. O valor mais alto dessa série foi registrado durante o declínio do ciclo solar 20, enquanto que o mais baixo, no início do ciclo solar 22.

Reconstruindo essa série temporal para a escala de período de 64 meses, obteve-se uma curva contínua e diferenciável por partes, uma vez que se observa descontinuidades durante o início do ciclo solar 20 e no máximo do ciclo 22, conforme exposto na figura

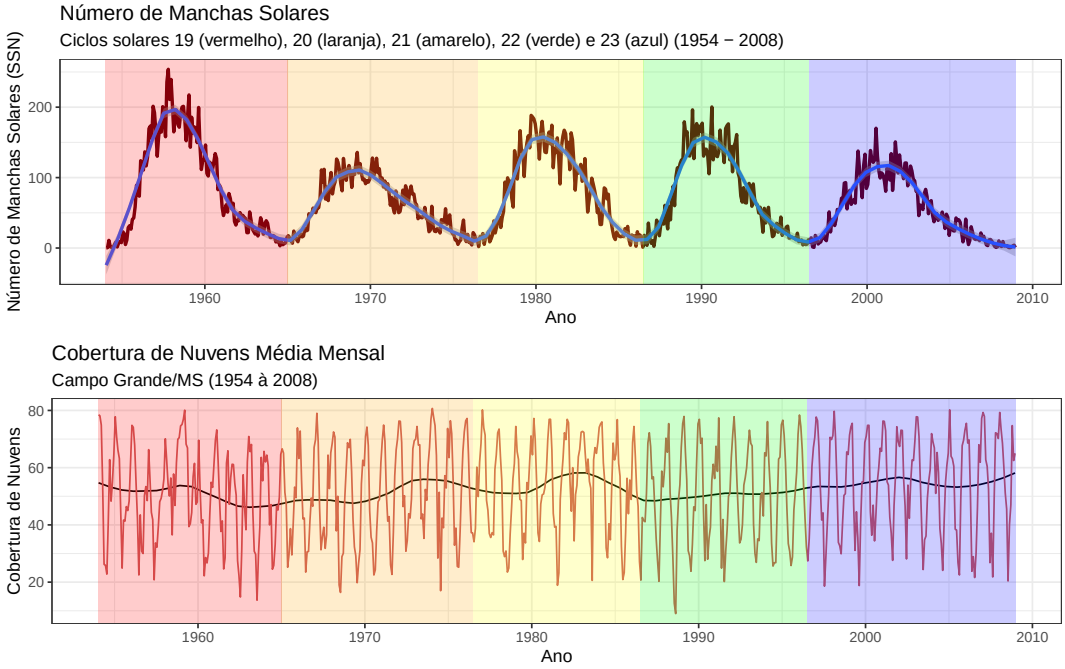


Figura 112 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande/MS

113. Quanto ao nível de potência desse sinal, observa-se valores mais elevados durante os ciclos 19 e 23, e níveis mais moderados nos ciclos intermediários. Comparando as duas reconstituições mostradas na figura, nota-se uma diferença de fase próxima a 180º durante a maior parte do tempo.

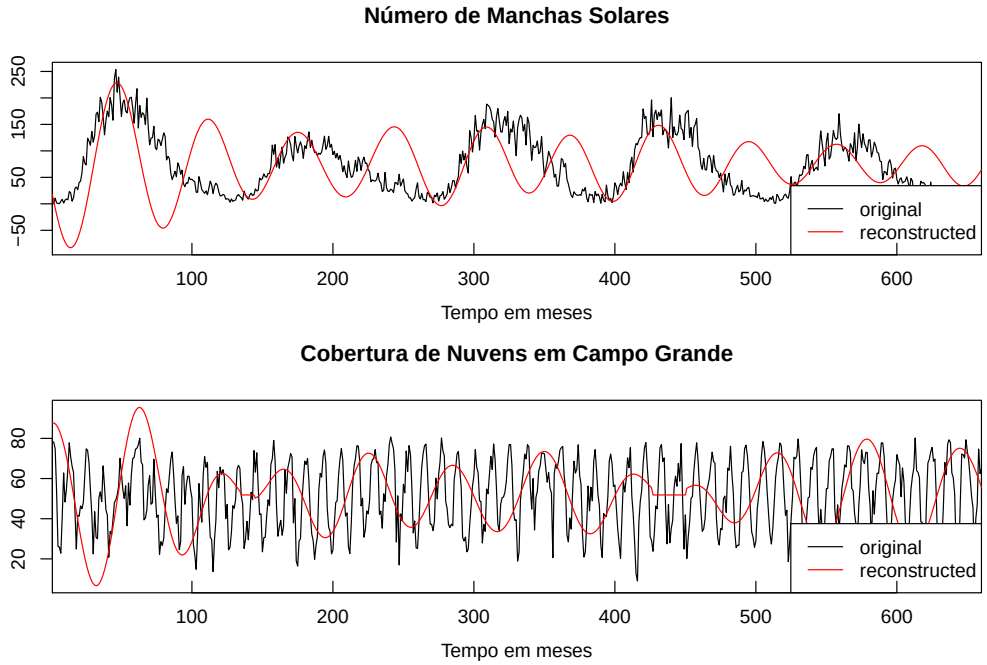


Figura 113 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a periodicidade de 128 meses, a figura 114 mostra a reconstrução dessa série

apresenta potência mais elevada durante os ciclos intermediários e potencias mais baixas nos ciclos mais extremos, conforme pode ser visto pela variação da amplitude da curva. Comparando com o Número de Manchas Solares, percebe-se uma oposição de fase entre as duas reconstituição, indicando assim uma possível anti-correlação.

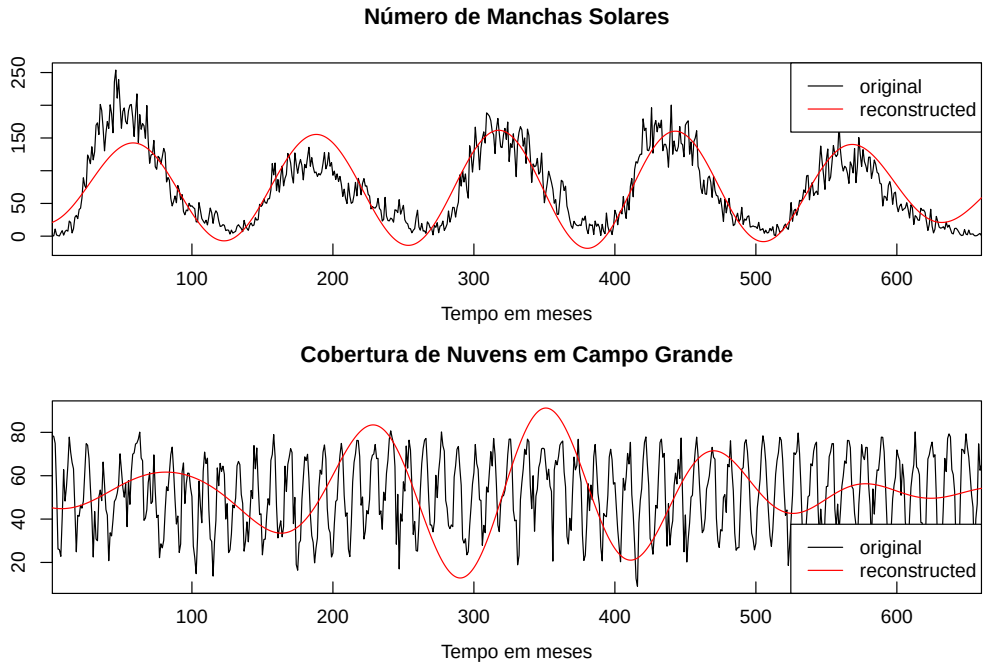


Figura 114 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Aplicando a reconstrução dessa série para a escala de 256, observa-se uma potência constante ao longo do período, tendo em vista que não se observa grandes variações na amplitude da curva, conforme mostrado na figura 115. Comparando ambos os gráficos, percebe-se que as reconstituições variam em fase.

Por fim, aplicando a Análise de Coerência Wavelet entre os índices de atividade solar e a cobertura de nuvens em Campo Grande, obteve-se os resultados mostrados na figura 116. Para periodicidades entre 512 e 256 meses, observa-se índices de coerência próximos a 1 durante todo o período de estudo na relação Número de Manchas Solares/Cobertura de Nuvens, e entre o ciclo 19 e 22, para a relação Emissão Solar F10.7/Cobertura de Nuvens. Em ambos os casos, observa-se ângulos de fase próximos a 270º, conforme indicam as setas voltadas para baixo.

Para a escala de período de 128 meses, os gráficos indicam níveis de coerência espectral entre 0,7 e 1 entre o mês 200 e 500, para a relação mostrada na parte superior, e entre o mês 1 e o 550, na relação exposta no painel inferior. Quanto a diferença de fase, observa-se durante a maior parte do tempo, ela assume valores próximos a 90º, conforme

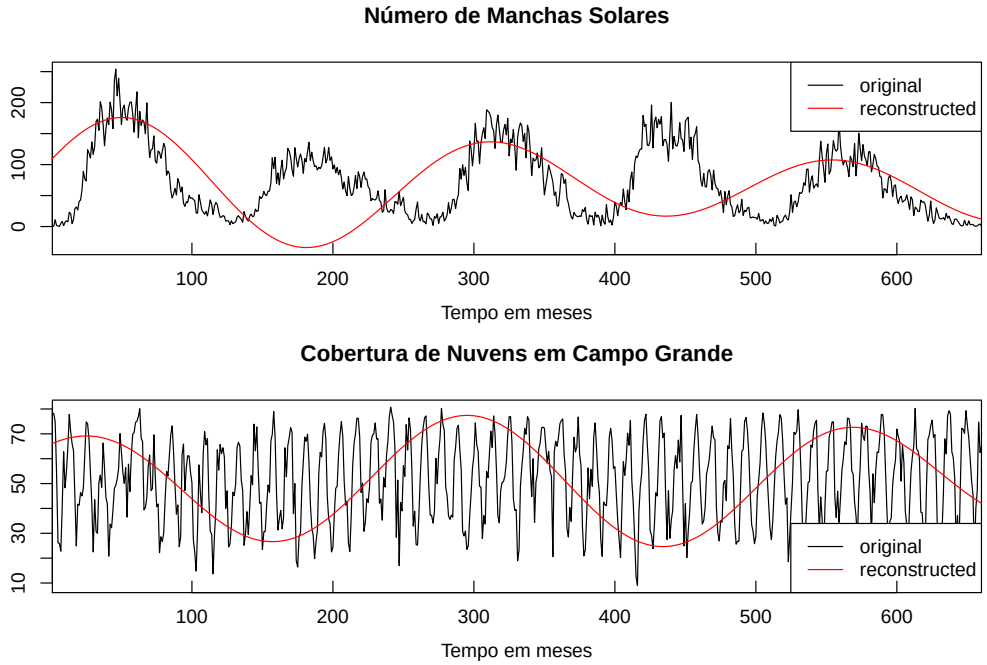


Figura 115 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

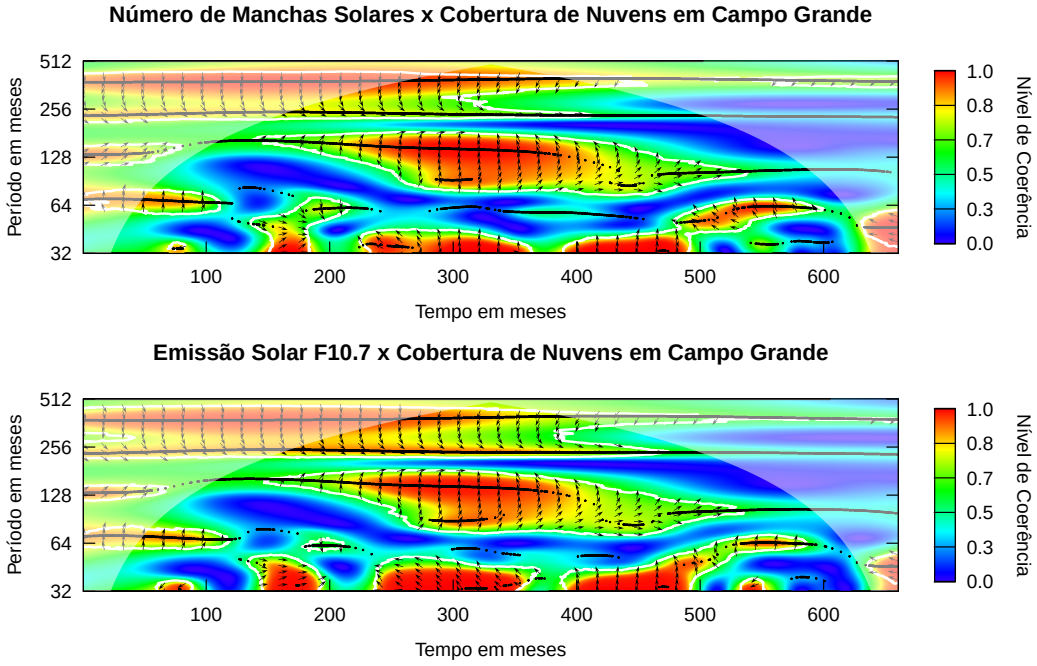


Figura 116 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Campo Grande e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

indicam as setas voltadas para cima. Já para periodicidades entre 32 e 64 meses, observa-se níveis de coerência próximos a 1 entre os meses 150 e 200, 250 e 350, 400 e 500.

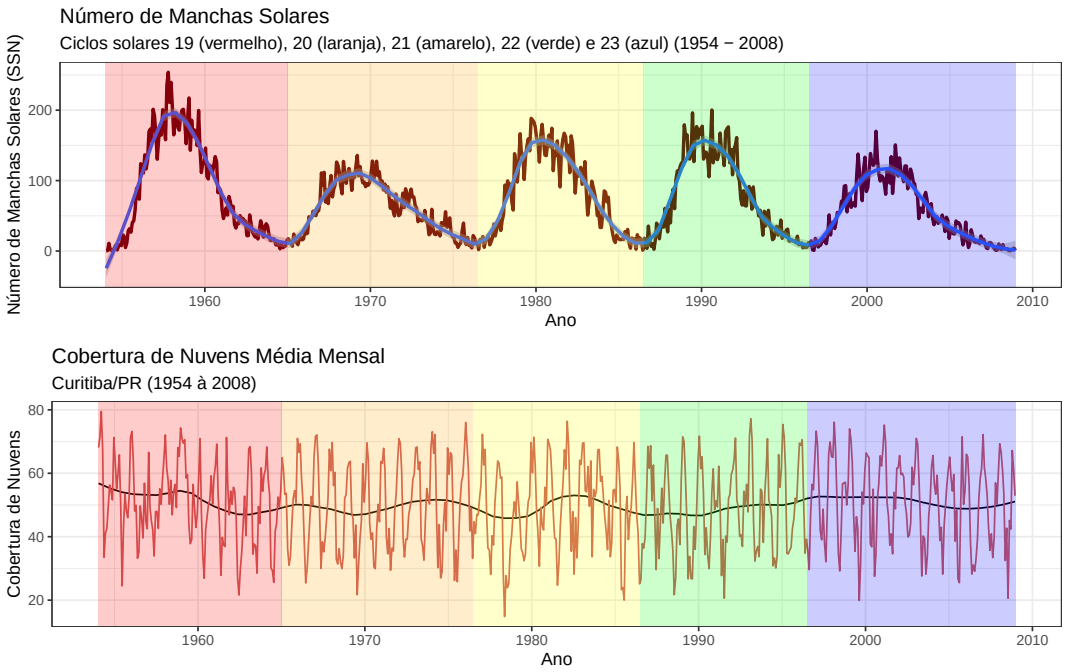


Figura 117 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba/PR

4.6.2 Curitiba

A cobertura de nuvens média mensal na cidade de Curitiba pode ser vista na figura 117, onde observa-se que a média suavizada esteve próxima a 50% ao longo do tempo. Durante o ciclo solar 19, percebe-se que essa média segue um perfil decrescente, diminuindo de níveis próximos a 60% para valores abaixo de 50%, ao término desse ciclo. Para o ciclo 20, nota-se que essa média manteve-se abaixo de 50%, com um comportamento aproximadamente constante e com poucas oscilações. No ciclo solar 21, observa-se um pico de variação nessa média, onde ela passa a ter valores superiores ao citado anteriormente. Nos dois últimos ciclos dessa série, observa-se um leve crescimento dessa curva suavizada entre os anos de 1990 e 1997, e uma pequena diminuição após o ano de 2002.

Ao se reconstituir essa série para a periodicidade de 64 meses e compará-la com aquela relativa ao Número de Manchas Solares, observa-se que as duas curvas variam em oposição de fase ao longo de todo o tempo de estudo, conforme exposto na figura 118. Quanto ao nível de potência dessa série para essa escala de período, a amplitude da curva indica valores elevados durante o ciclo solar 19, e graus mais moderados no restante do tempo.

Reconstituindo essa série para a escala de período de 128 meses, observa-se níveis de potência elevados durante os ciclos 20, 21 e 22 e valores mais baixos nos ciclos 19 e 23, conforme indica a parte inferior da figura 119. Quanto a diferença de fase entre as duas curvas mostradas nessa figura, percebe-se que ela situa-se próximo a 90º durante a maior parte do tempo.

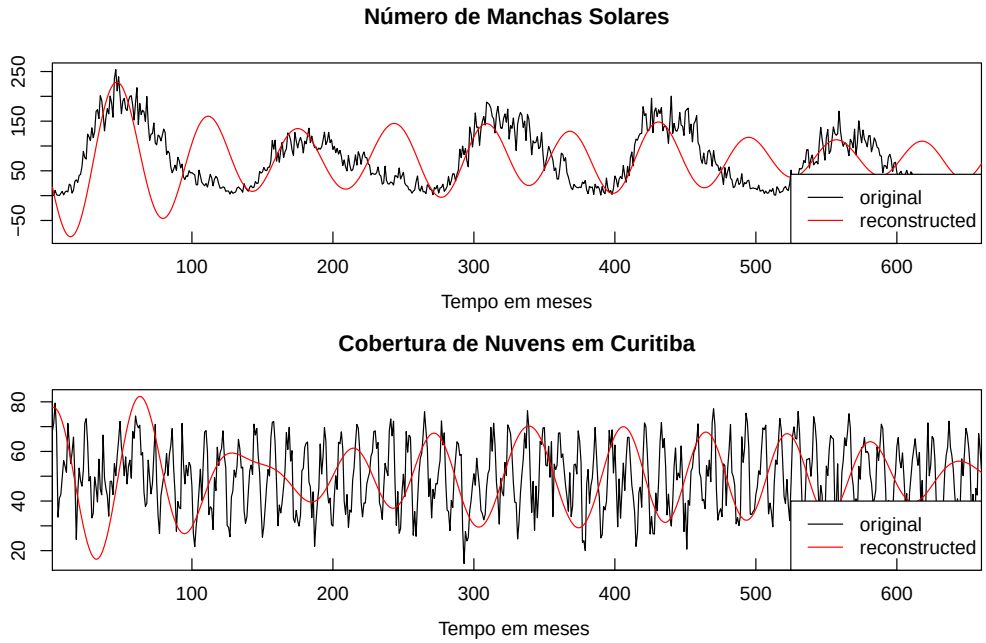


Figura 118 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

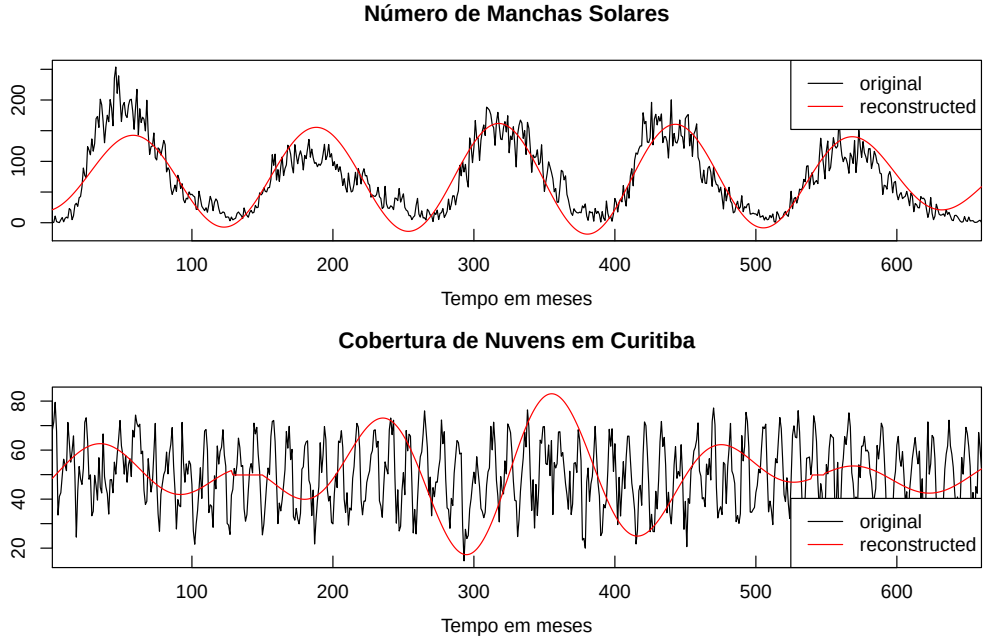


Figura 119 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Já para a escala de período de 256, a figura 120 mostra que essa série possui uma potência constante ao longo do tempo, e varia com uma diferença de fase próxima a 90º com o Número de Manchas Solares.

Ao aplicar a Análise de Coerência Espectral Wavelet entre a cobertura de nuvens

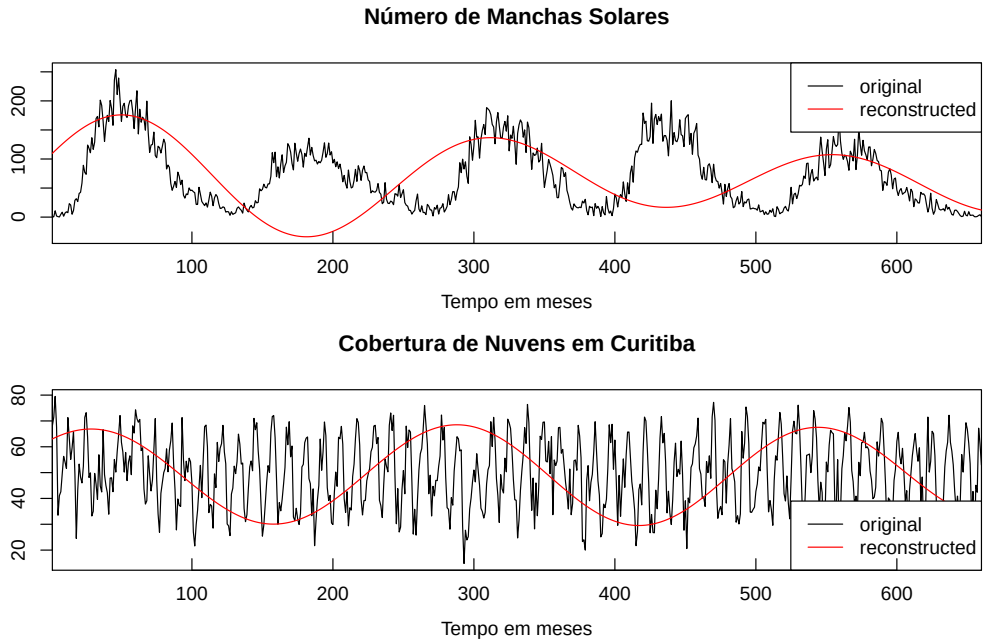


Figura 120 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

na cidade de Curitiba, observa-se níveis de coerência espectral próximos a 1 para as escalas de período de 256, 128 e 64 meses, conforme mostram os gráficos da figura 121. No primeiro caso, observa-se esses altos níveis de coerência durante os ciclos 19, 20 e parte do 21, na relação Número de Manchas Solares/Cobertura de nuvens, e durante quase todo o tempo na relação Emissão Solar F10.7/Cobertura de Nuvens. Nos dois casos sitados, as setas presentes nessa região de elevada coerência indicam uma diferença de fase entre 270º e 360º.

Para a escala de período de 128 meses, esse nível de coerência próximo a 1 pode ser observado entre os meses 250 e 450, portanto, durante o ciclo solar 21. Nesse período, as setas voltadas para cima indicam um ângulo de fase próximo a 90º. Já para a periodicidade de 64 meses, observa-se elevados graus de coerência entre o mês 1 e o 100, próximo ao mês 300, e entre os meses 400 e 550 dessa série.

4.6.3 Porto Alegre

A cobertura de nuvens mensal média na cidade de Porto Alegre/RS pode ser visualizada graficamente na figura 122. Durante o ciclo solar 19, observa-se a ocorrência de anos com elevados níveis de cobertura, o que pode ser visto tanto pelos dados reais como pela média suavizada, a qual passa por um pico durante o máximo de atividade solar desse ciclo. Nos ciclos 20, 21 e 22, a curva suavizada desses dados mostra uma queda nos índices de cobertura de nuvens durante esse período, estando abaixo de 45%. Contudo, foi

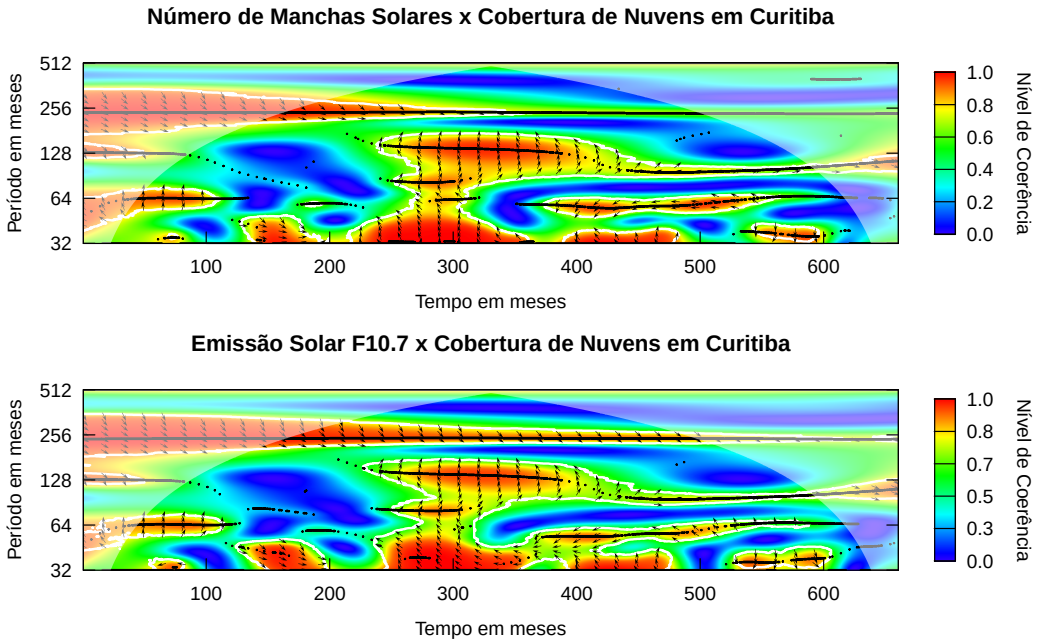


Figura 121 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Curitiba e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

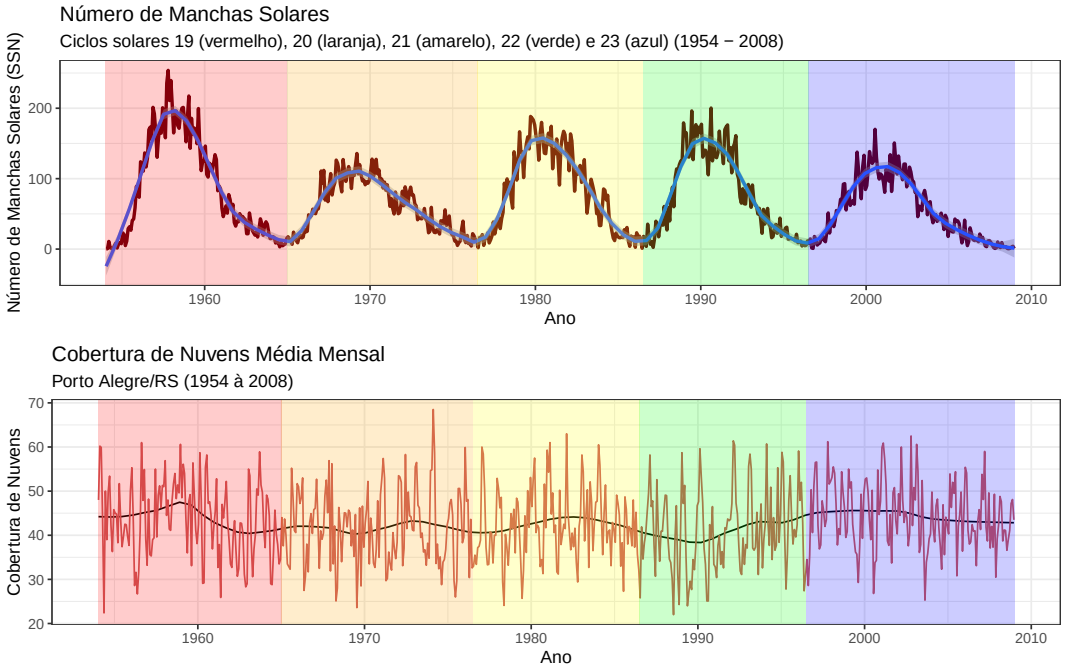


Figura 122 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS

durante o declínio do ciclo solar 20, o mais fraco de toda a série, que houve o pico máximo nos dados reais. Após uma queda mais acentuada entre os anos de 1980 e 1990, nota-se que a curva suavizada torna a ter um aumento, e passa a ter valores mais próximos a 45% durante o ciclo solar 23.

Aplicando a função de reconstrução nessa série temporal, obtém-se uma curva contínua e diferenciável por partes ao longo de seu domínio, uma vez que observa-se uma pequena descontinuidade durante o início do ciclo solar 20, como mostra a figura 123. Essa

reconstituição apresenta amplitudes variacionais grandes, durante o ciclo 19, pequenas no decorrer do ciclo 21, e moderadas nos demais ciclos. Comparando com o Número de Manchas Solares, nota-se que essa reconstituição varia com uma diferença de fase próxima a 90º durante o ciclo 19, e próxima a 180º nos demais ciclos.

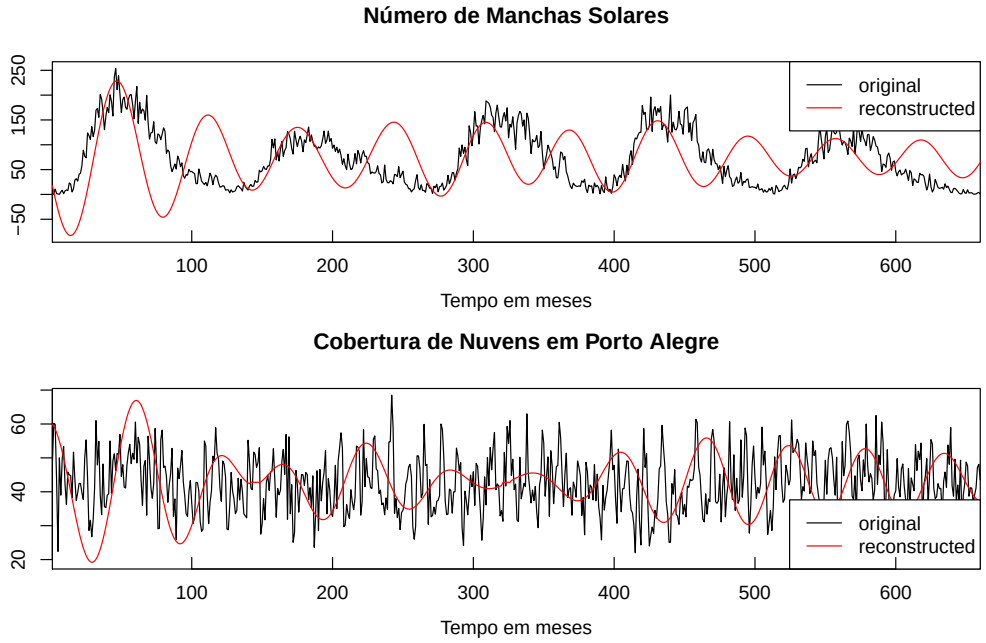


Figura 123 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Em relação à escala de período de 128, a reconstituição dessa série mostrou-se viável até o 600º mês dessa série, conforme indica a figura 124. Quanto a diferença de fase com o Número de Manchas Solares, observa-se que ambas reconstituições variam em fase durante o ciclo 19, com uma diferença de fase próxima a um quarto de círculo durante o ciclo 20 e com uma defasagem de meio círculo nos demais ciclos solares. Quanto a amplitude, observa-se valores moderados e elevados ao longo do tempo.

Já para a periodicidade de 256 meses, a reconstrução dessa série apresenta uma amplitude variacional moderada ao longo de todo o tempo e mostra-se em fase com a reconstituição relativa ao Número de Manchas Solares, conforme mostra os gráficos da figura 125.

Correlacionando a cobertura de nuvens em Porto Alegre com os índices de atividade solar, observa-se níveis de coerência superiores a 0,7 para a escala de período de 256 nos dois gráficos mostrados na figura 126. Contudo, na relação Número de Manchas Solares e Cobertura de Nuvens, observa-se esses níveis de coerência até o mês 200, enquanto que, na relação com a Emissão Solar F10.7, tais níveis de coerência são vistos até o 500º mês.

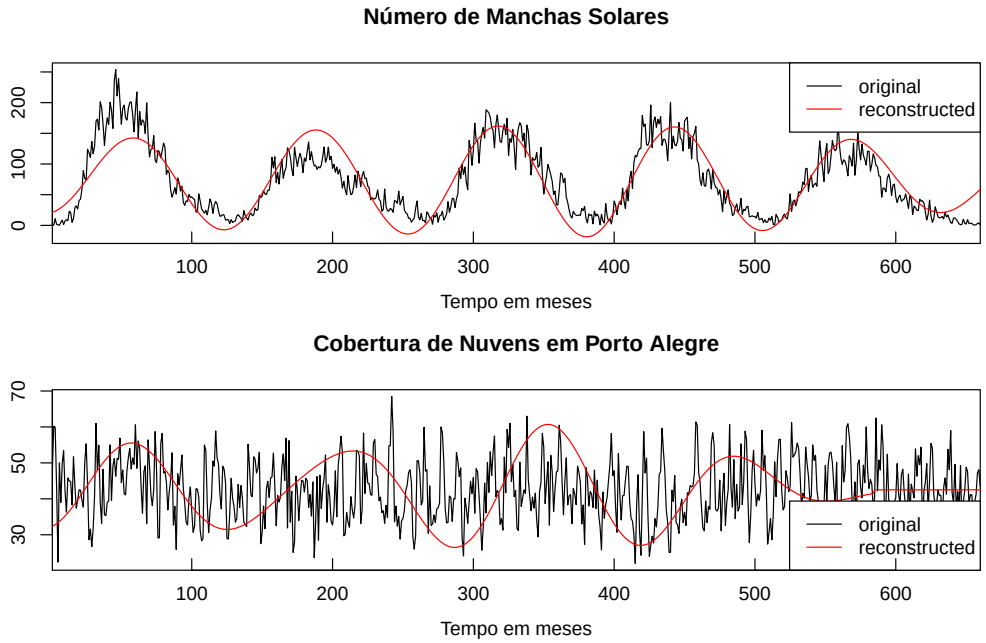


Figura 124 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

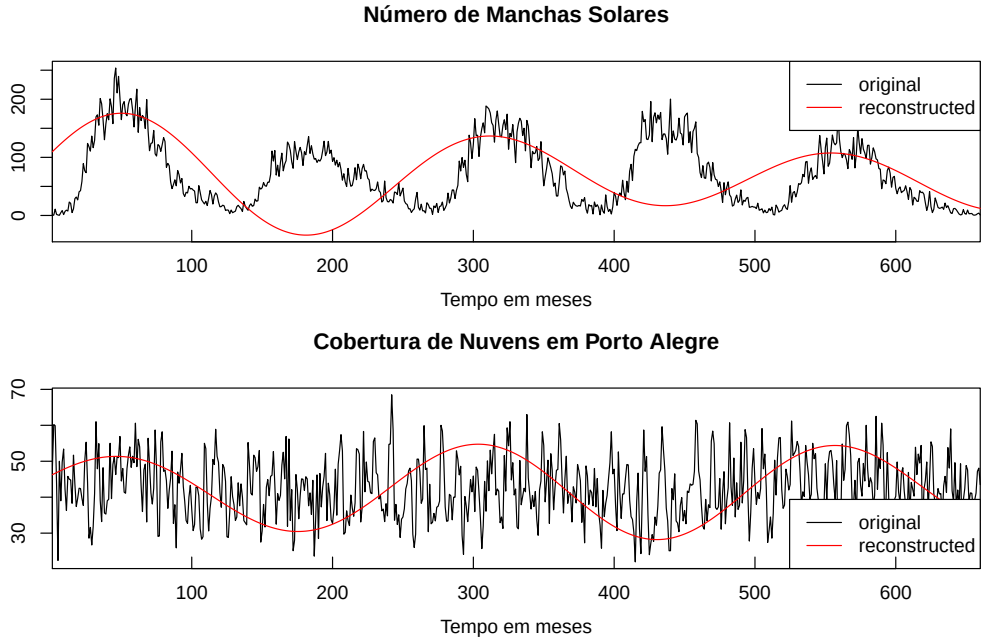


Figura 125 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Quanto a diferença de fase, as setas voltadas para frente indicam um ângulo próximo a 360º.

Para periodicidades próxima a 11 anos, ou 128 meses, percebe-se níveis de coerência espectral durante os ciclos solares 19 à 22, ou seja, entre o primeiro e o 500º. Dentro dessa

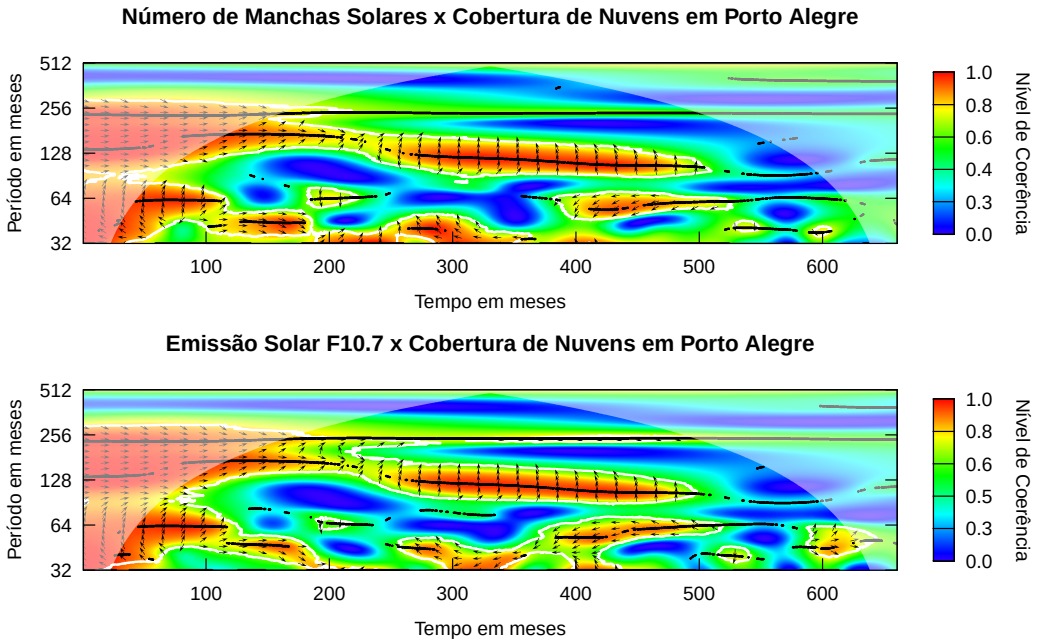


Figura 126 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Porto Alegre e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

faixa, as setas indicam uma diferença de fase próxima a 0 graus durante os ciclos 19 e 20, e próximas a 90º nos ciclos 21 e 22. Para as escalas de períodos entre 64 e 32 meses, observa-se altos níveis de coerência entre os meses 1 e 100, 250 e 500 e próximo ao mês 600.

4.6.4 Rio de Janeiro

Por fim, na figura 127 tem-se a variação mensal da cobertura de nuvens registrada na cidade do Rio de Janeiro. Observa-se nesse gráfico que a média suavizada dos dados esteve entre 60% e 50% ao longo do tempo. Durante o ciclo solar 19, a curva suavizada apresenta uma queda de 60% para 50% durante os anos desse ciclo. No ciclo 20 e parte do 21, nota-se que essa curva sofre uma pequena oscilação, entre 1964 e 1975, e mantem-se constante até 1980. Após a segunda metade do ciclo 21, percebe-se outra oscilação nessa média nos anos próximos a 1980, seguido de um comportamento constante até o fim do tempo do estudo. O maior valor registrado nessa série ocorreu no início do ciclo 19, enquanto que o valor mais baixo, no término do ciclo 23.

Reconstruindo essa série para a periodicidade de 64, a figura 128 mostra uma diferença de fase entre as séries próxima a 180º durante todo o tempo de estudo. Quanto a amplitude da curva, observa-se valores elevados, exceto durante a fase de declínio dos ciclos 20 e 23.

Para a escala de período de 128 meses, a reconstrução presente na figura 129

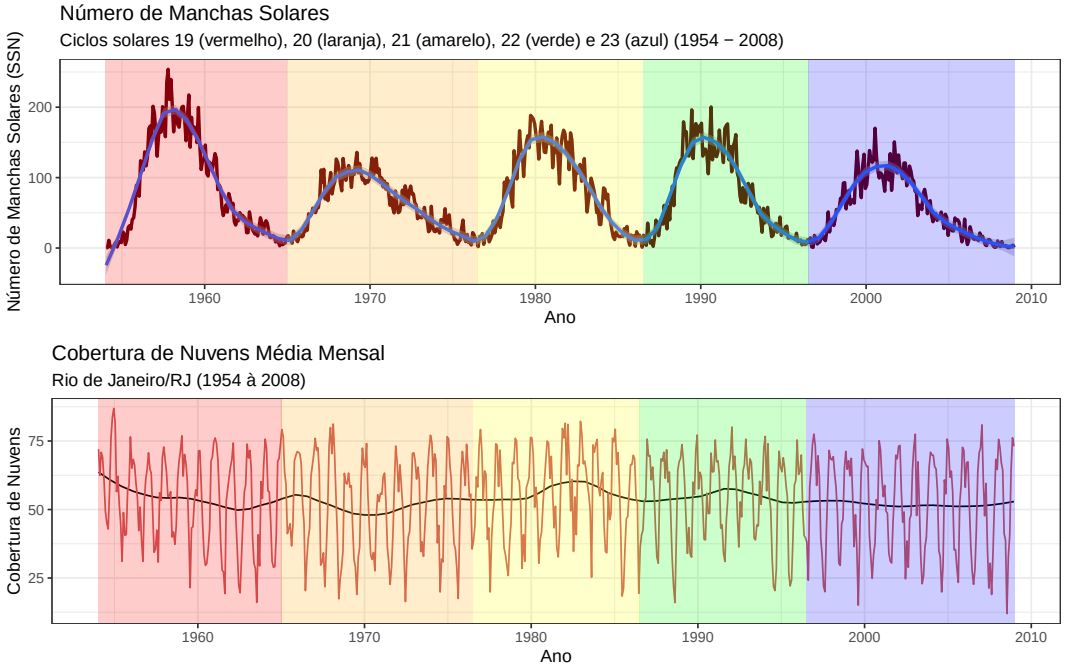


Figura 127 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro

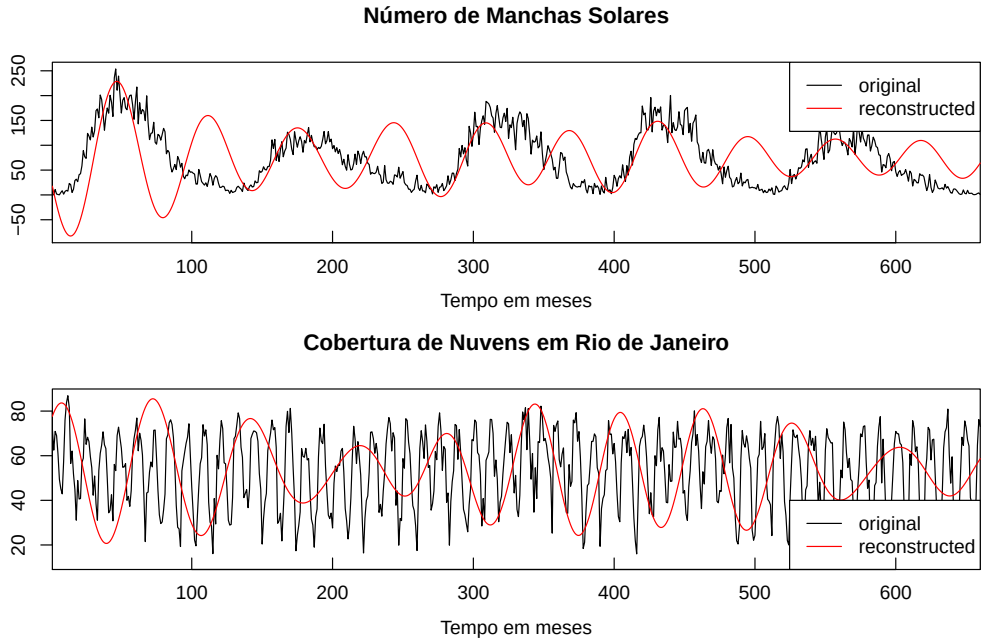


Figura 128 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

mostra amplitudes moderadas entre os meses 200 e 300, assim como após o mês 600. No restante do tempo, observa-se valores elevados de amplitude, denotando assim uma potência Wavelet relativamente elevada, para essa periodicidade. Quanto a diferença de fase, percebe-se valores próximos a 180º durante os ciclos 19 e 20, e valores entre 0 e 90º nos demais ciclos.

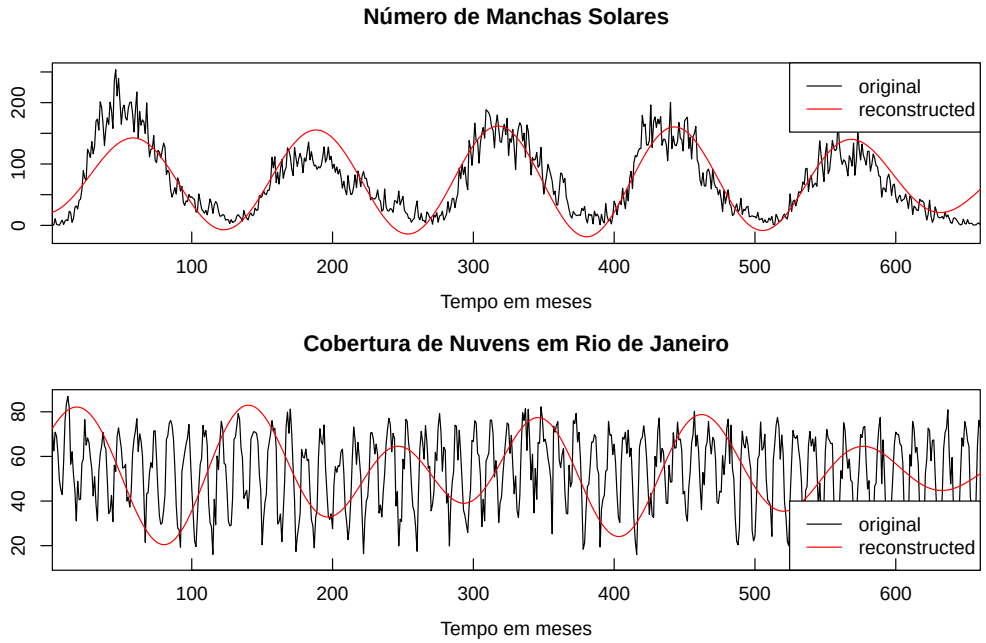


Figura 129 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Os se reconstruir essa série para a escala de 256 meses, observa-se uma descontinuidade entre os meses 500 e 600. Comparando com o Número de Manchas Solares, percebe-se que as duas reconstituições variam em fase ao longo do tempo. Além disso, nota-se uma amplitude contante e moderada.

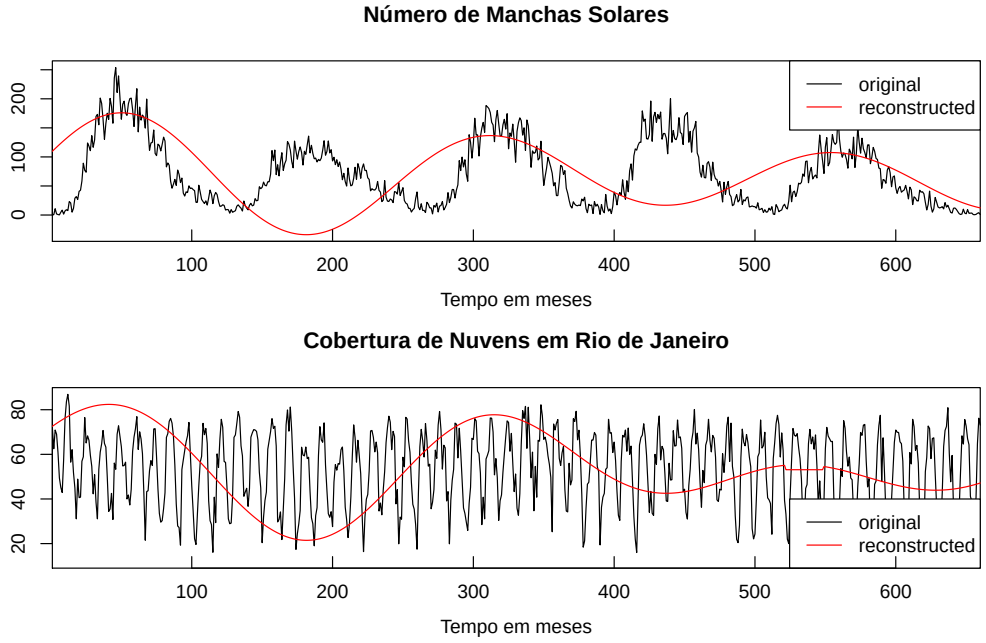


Figura 130 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Por fim, na figura 131 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre os índices

de atividade solar e a cobertura de nuvens na cidade do Rio de Janeiro. A evidente região avermelhada na parte superior dos dois gráficos indica níveis de coerência espectral próximos a 1, para a escala de período entre 512 e 256 meses. Nessa área, as setas voltadas para o lado inferior direito indica uma diferença angular de fase entre 270º e 360º.

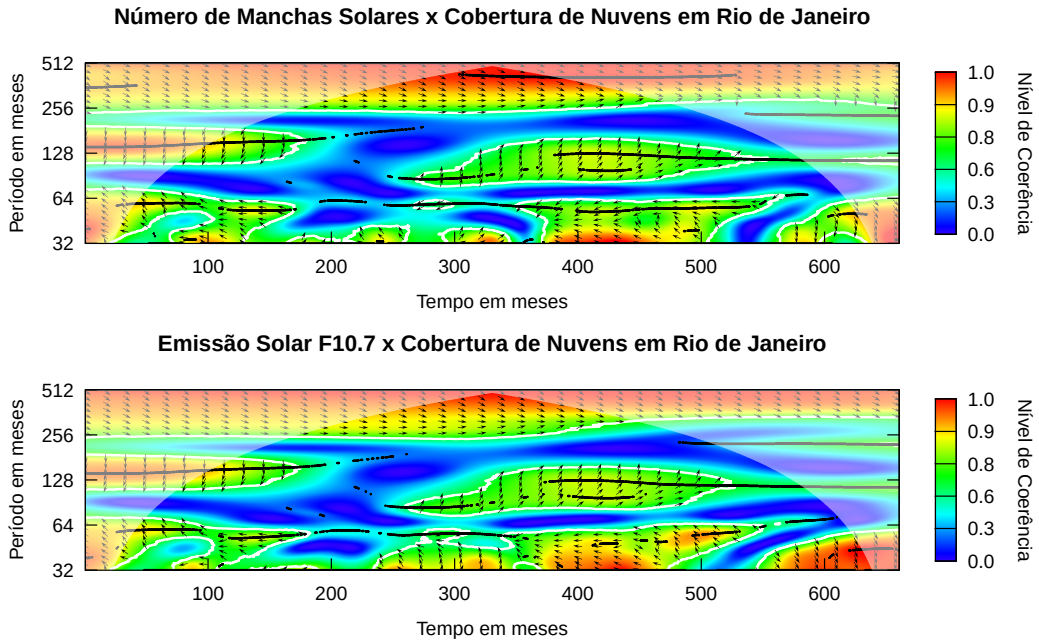


Figura 131 – Análises de Coerência Wavelet entre a Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

Para periodicidade de 128 meses, nota-se níveis de coerência superiores a 0,8 durante os ciclos 19 e 20, e entre 0,8 e 0,9 nos ciclos solares 21 e 22. Nos dois primeiros ciclos citados, percebe-se ângulos de fase próximos a 270º, enquanto que nos outros dois, ângulos entre 90º e 0 graus. Para periodicidades entre 64 e 32 meses observa-se algumas regiões com o nível de coerência superiores a 0,8. Para essa escala, observa-se ângulos de fase próximos a 180º.

4.7 Precipitação Total

4.7.1 Campo Grande

Na figura 132 tem-se o valor acumulado mensalmente de precipitação observada em Campo Grande/MS, paralelamente com o Número de Manchas Solares. Durante o ciclo solar 19, observou-se picos de precipitação oscilando entre 150 e 350 mm. Os maiores valores dessa período ocorreram durante a fase de crescimento e de declínio do ciclo. Os menores, durante o máximo desse ciclo e no final. A média suavizada sofre um aumento de

120 para 140 mm durante a primeira metade do período, e diminui para 100 no decorrer da segunda. No ciclo solar 20, observa-se que a média suavizada sofre poucas variações com o decorrer do tempo, exceto no término do período, onde ela aumente de valores próximos a 100 para valores próximos a 140 mm. Quanto aos picos de precipitação, observa-se nesse que eles variam entre 200 e 350 mm ao longo do tempo. Os anos de maiores precipitações nesse ciclo ocorreram durante o máximo do ciclo, ao passo que os de menores índices, no início e término.

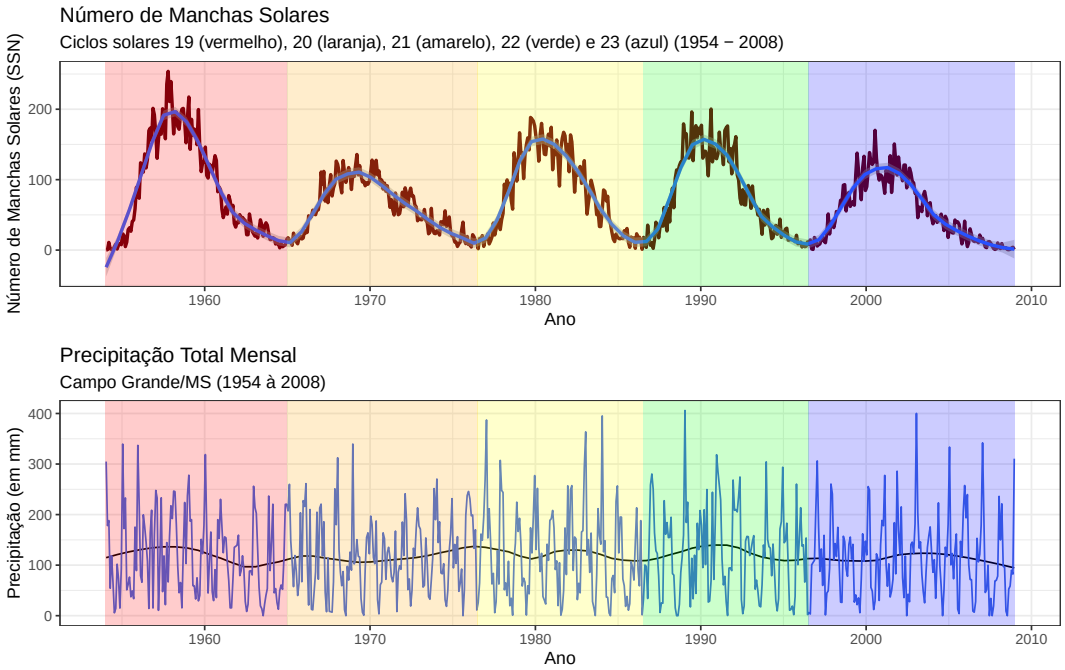


Figura 132 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Campo Grande/MS

Durante o ciclo 21, observa-se uma aparente anti-correlação entre os dois gráficos ao observar que durante os anos de mínima atividade solar os índices de precipitação atingiram valores próximos a 400 mm, enquanto que durante o máximo solar, os níveis ficaram abaixo de 300 mm. Durante esse período, observa-se que a média suavizada sofreu oscilações entre 150 e 100 mm. Quanto ao ciclo 22, nota-se que a média suavizada passa por um crescimento de 100 a 150 mm durante a primeira metade do ciclo, tornando a níveis próximos a 100 mm durante a segunde metade. Em relação aos máximos de precipitação, percebe-se que durante esse ciclo eles permaneceram abaixo de 350, com exceção do ano de 1989, onde registrou-se um pico acima de 400 mm. Já para o ciclo 23, a curva suavizada não demonstra grandes oscilações ao longo do tempo, somente entre 2000 e 2008 é que ela passa por um pequeno aumento seguido de diminuição. Quanto aos máximos sazonais, observa-se valores inferiores a 300 mm durante a primeira metade do ciclo, e valores superiores a este durante a segunda metade.

Reconstruindo essa série a para a escala de período de 64 meses, observa-se

descontinuidades na curva durante os ciclos 19 e 23, conforme mostrado na figura 133. Quanto a potência Wavelet para essa periodicidade, observa-se valores elevados durante o ciclo solar 21, e níveis mais moderados nos demais ciclos. Comparando com o Número de Manchas Solares, observa-se que as duas reconstituições variam em oposição de fase durante a maior parte do tempo.

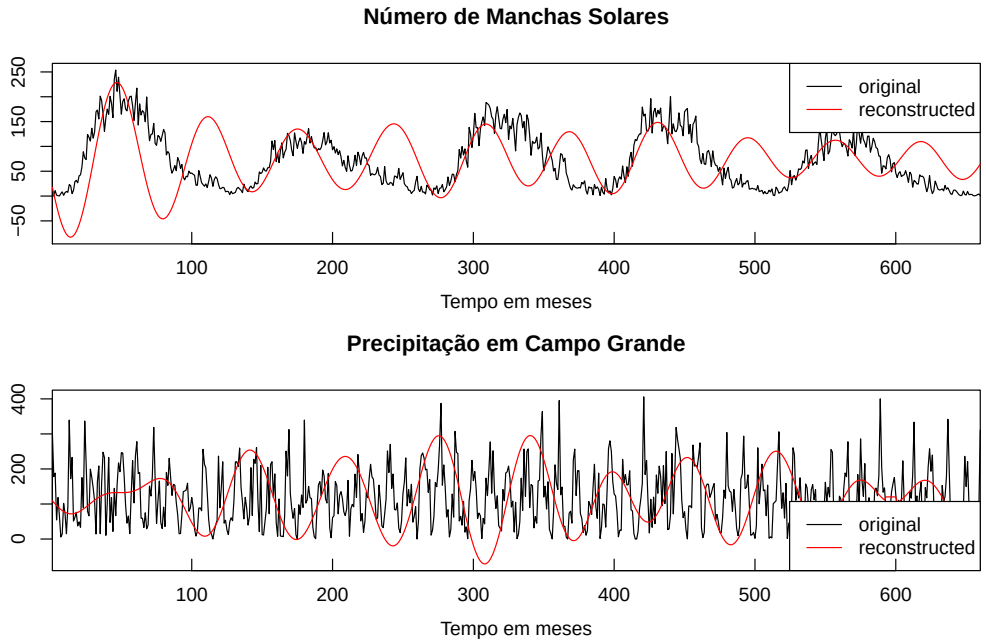


Figura 133 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a escala de período de 128 meses, a figura 134 mostra uma reconstituição com níveis de potência moderados durante todo o período, exceto para o ciclo solar 21, onde o achatamento da curva indica um baixo nível durante os meses próximos ao 300. Nessa figura, percebe-se que as duas reconstituições variam em fase ao longo do tempo.

Ao aplicar a reconstrução dessa série para a escala de período de 256 meses, a figura 135 mostra níveis de potência Wavelet moderado entre o mês 1 e 400, e níveis mais baixos no restante do tempo, semelhantemente ao observado com o Número de Manchas Solares. As duas reconstruções expostas nesses gráficos variam com uma diferença de fase próxima a 90º.

Por fim, aplicando a Análise de Coerência Wavelet entre essa série e os índices de atividade solar, observa-se que, para periodicidades entre 512 e 256 meses, o grau de coerência entre as séries manteve-se próximos a 1 durante todo o tempo, conforme indica a região avermelhada na parte superior da figura. Nessa área, as setas voltadas para o lado inferior direito indicam que tais séries encontram-se aproximadamente em fase, para essa escala de período.

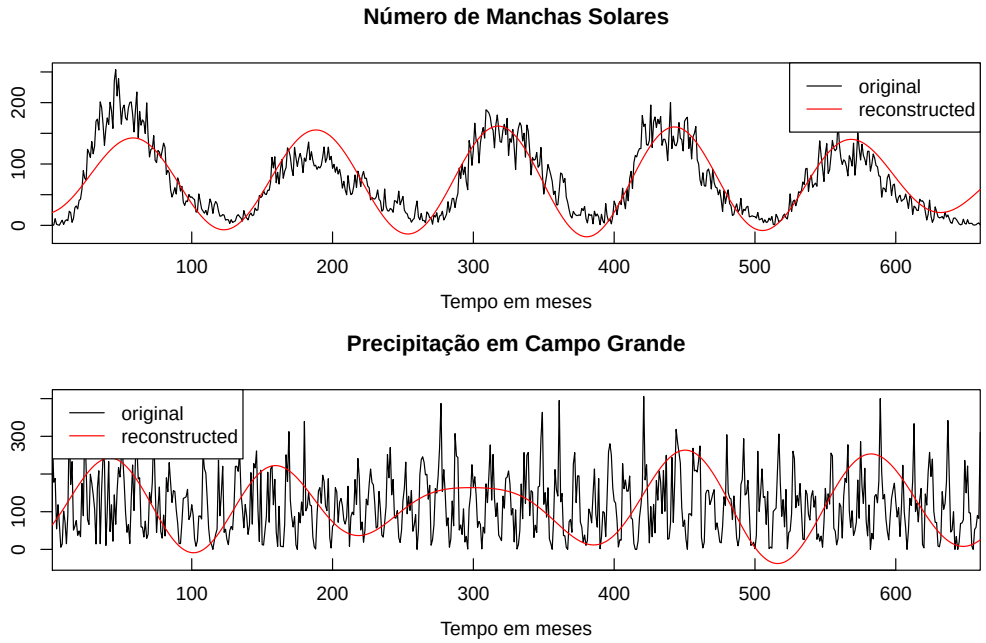


Figura 134 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

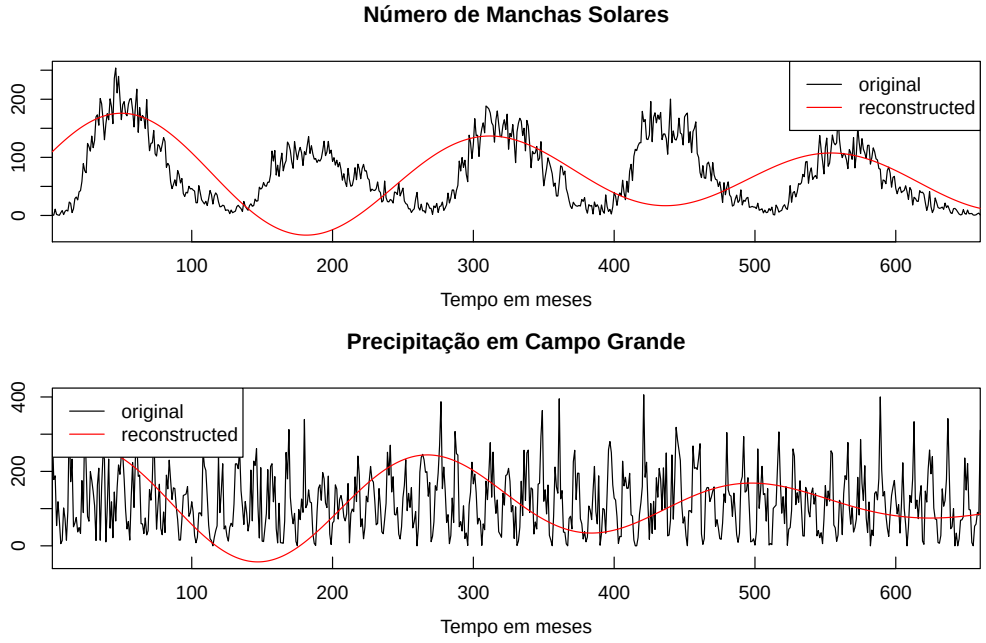


Figura 135 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Campo Grande (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

Para a periodicidade de 128 meses, observa-se índices de coerência espectral entre 0,8 e 0,9 durante os ciclos solares 19, 22 e 23. No início do ciclo solar 19, assim como no término do ciclo solar 23, observa-se uma região mais avermelhada, indicando assim níveis de coerência mais próximos a 1 durante tais momentos. Para tal escala de período, a dominância de setas voltadas para o lado direito indicam que os índices de atividade

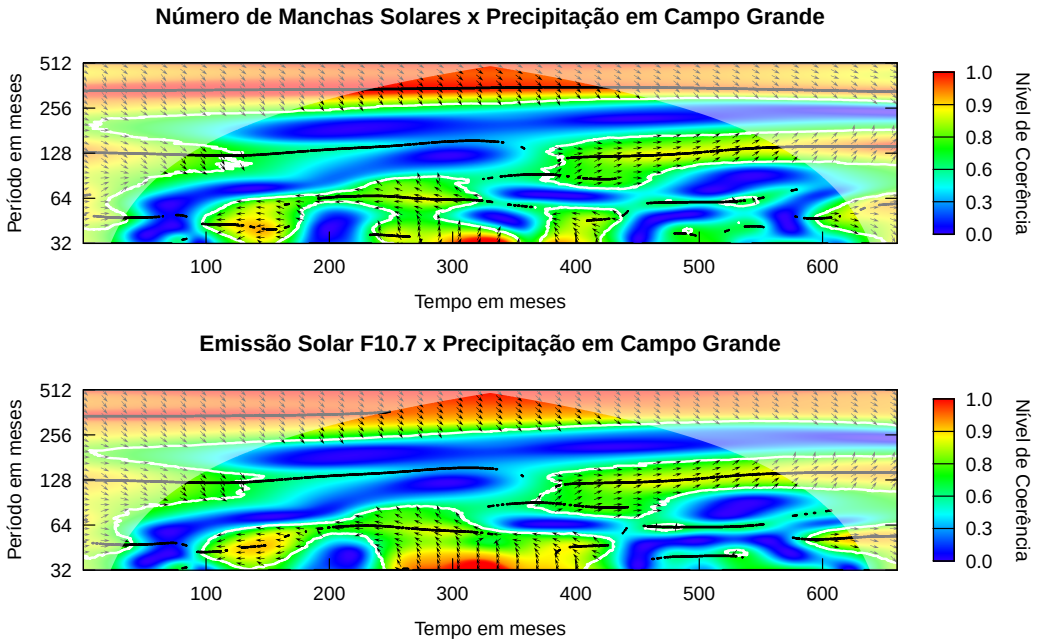


Figura 136 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Campo Grande/MS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

solar e a precipitação em Campo Grande/MS estão oscilando em fase. Já para as escalas de períodos próximas a 64 meses, observa-se índices de coerência superiores a 0,8 entre o mês 100 e o 400, com um ângulo de fase próximo a 180º.

4.7.2 Curitiba

Na figura 137 tem-se a precipitação total mensal observada na cidade de Curitiba durante o período desse estudo. Nesse gráfico, observa-se que os máximos sazonais mantiveram-se entre 200 e 350 mm durante todos os ciclos solares, exceto para o ano de 1995, onde se registrou um pico próximo a 450 mm, durante uma fase de mínima atividade solar. No ciclo solar 19, a média suavizada apresentou poucas oscilações, mantendo-se próxima a marca de 125 mm durante o período. Os maiores níveis registrados nessa época foi de 300 e 325, durante o início e máximo desse ciclo, respectivamente. Nos demais anos, registrou-se valores abaixo de 300 mm. Durante o ciclo solar 20, observou somente uma pequena oscilação na média suavizada, a qual atingiu um mínimo próximo a 100 mm durante a primeira metade desse ciclo. O maior valor registrado para esse período foi de 340 mm, durante a sua fase de declínio.

Para o ciclo solar 21, observa-se uma variação na curva suavizada a qual atinge um ponto de máximo próximo ao ano de 1984. Os maiores níveis registrados nesse período foram de 300 e 350, aproximadamente, entre os anos de 1980 e 1985. No ciclo solar 22, nota-se que a média suavizada manteve-se constante ao longo do tempo. Nesse ciclo,

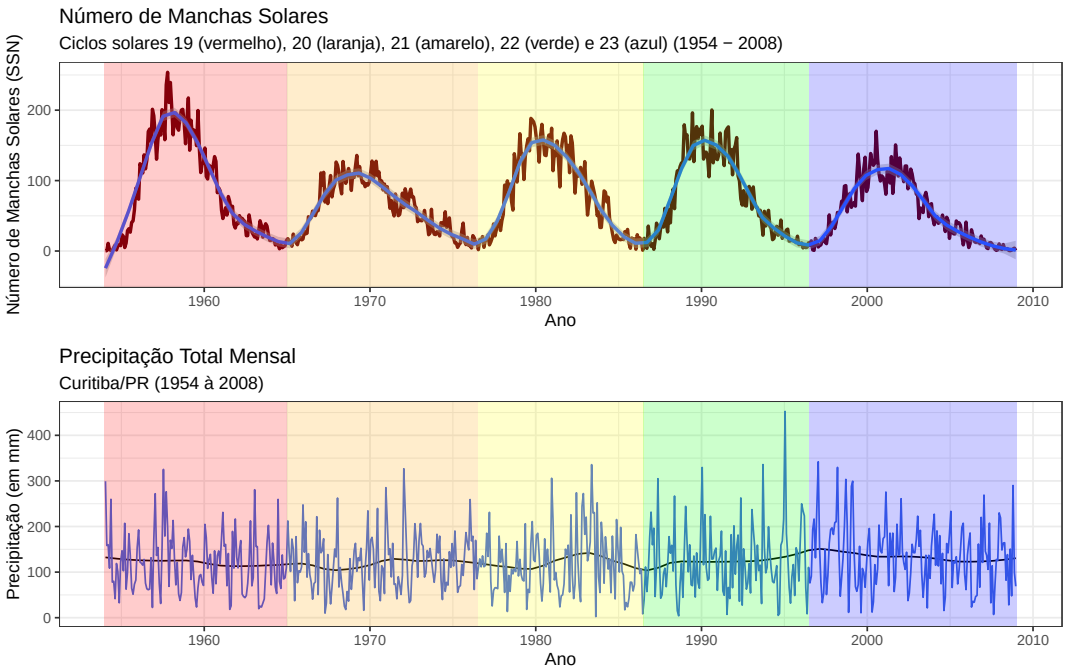


Figura 137 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Curitiba/PR

foram observados quatro meses onde o nível de precipitação ultrapassou a marca 300 mm. Já no ciclo solar 23, também observou-se uma média suavizada com poucas variações, e diminuindo de 150 para 130 com o passar do tempo. Quanto aos picos sazonais, observa-se valores acima de 300 mm somente na fase inicial do ciclo.

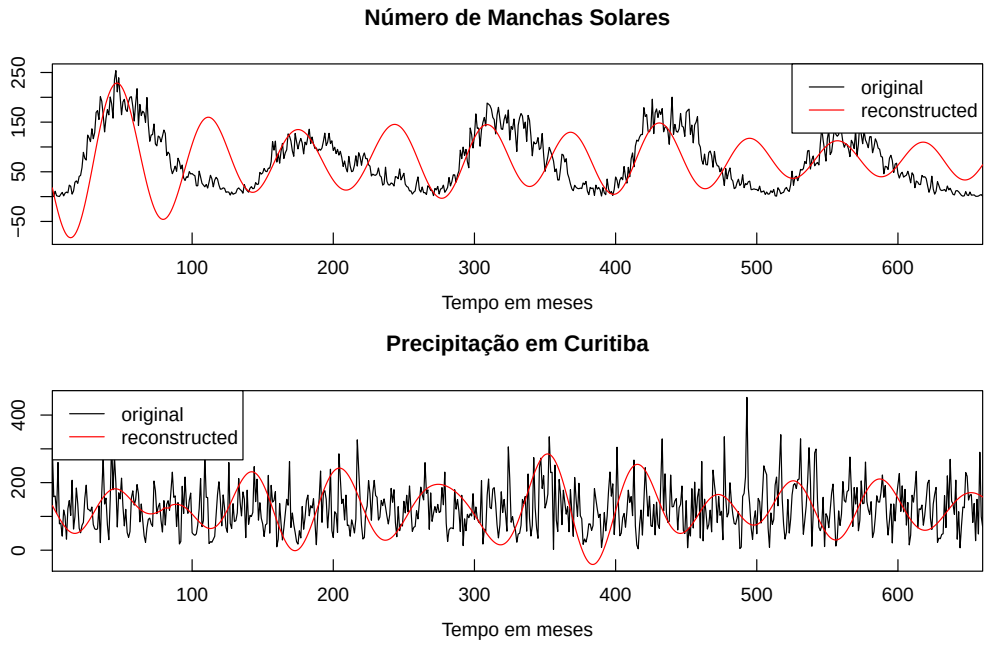


Figura 138 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Reconstituindo essa série para a escala de período de 64 meses, observa-se uma

descontinuidade dessa curva nos meses próximos ao centésimo mês, conforme mostra a figura 138. Essa reconstrução apresentou baixo níveis de potência durante quase todo o tempo. Somente no ciclo solar 19 e na transição do 20 para o 21 é que se observa níveis de potência mais elevados, conforme denota a amplitude da curva vermelha. Analisando em paralelo com o Número de Manchas Solares, nota-se que as duas reconstituições variam em oposição de fase durante a maior parte do tempo.

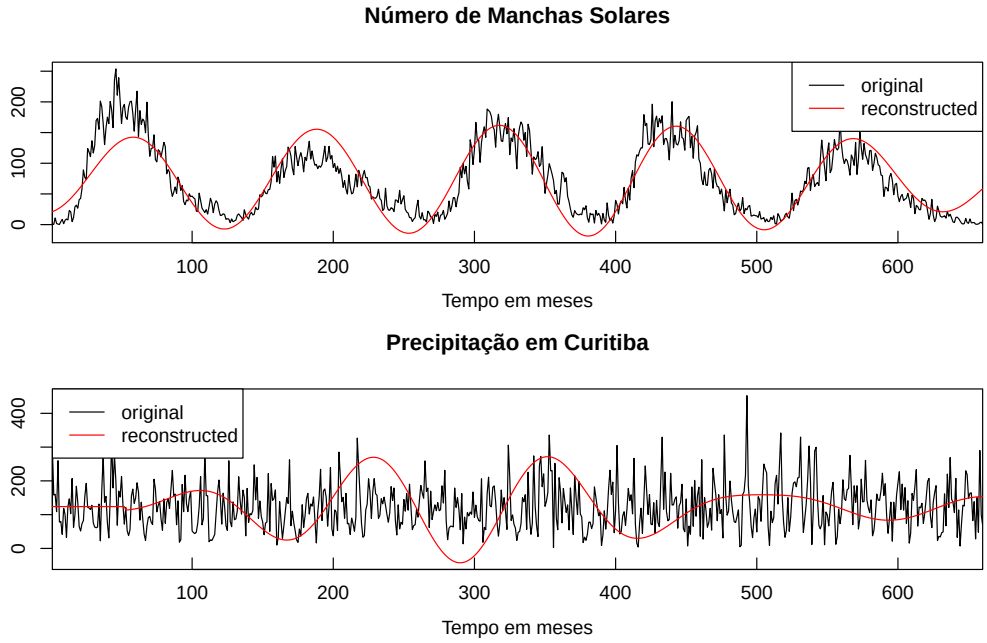


Figura 139 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Para a escala de período de 128 meses, a reconstituição desses dados mostra-se possível somente após o mês 50 dessa série, conforme mostra a figura 139. Em relação ao nível de potência, a reconstituição apresenta valores significativos somente durante os ciclos 20 e 21, onde observa-se que ela varia em oposição de fase com o Número de Manchas Solares.

Já para a periodicidade de 256 meses, a curva relativa a reconstrução dessa série apresenta um perfil contínuo e diferenciável ao longo de todo o seu domínio, conforme indica a figura 140. Nessa reconstituição, observa-se baixos níveis de potência Wavelet, conforme indica a baixa amplitude variacional da curva ao longo do tempo. Comparando com o Número de Manchas Solares, nota-se que as duas curvas variam em fase ao longo do tempo.

Buscando as correlações entre os índices relativos à atividade solar e a precipitação em Curitiba, a figura 141 mostra as Análises de Coerência Wavelet entre essas séries temporais. Para a escala de período de 256, observa-se níveis de coerência espectral

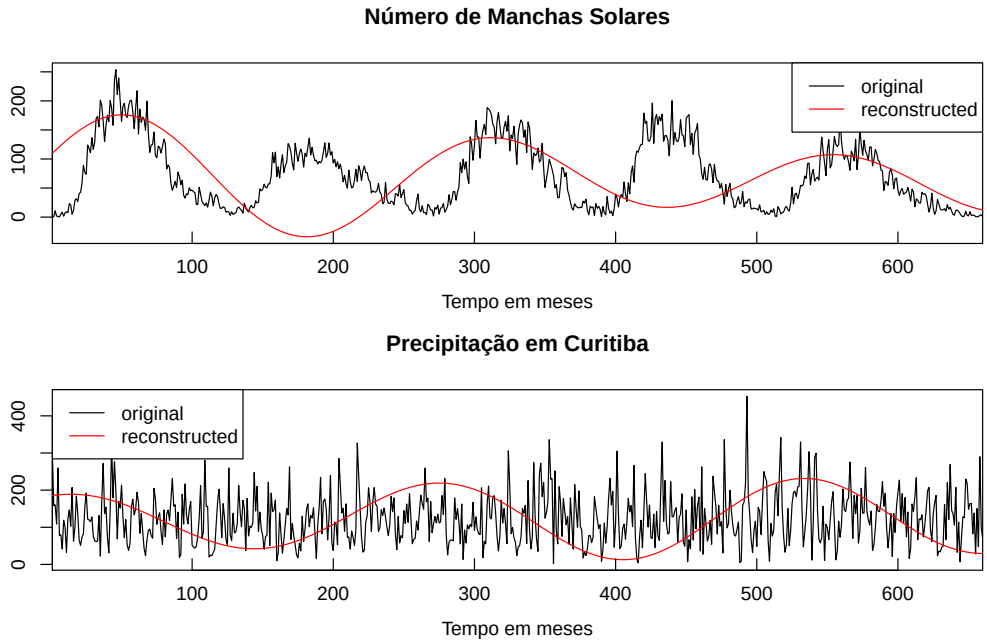


Figura 140 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Curitiba (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

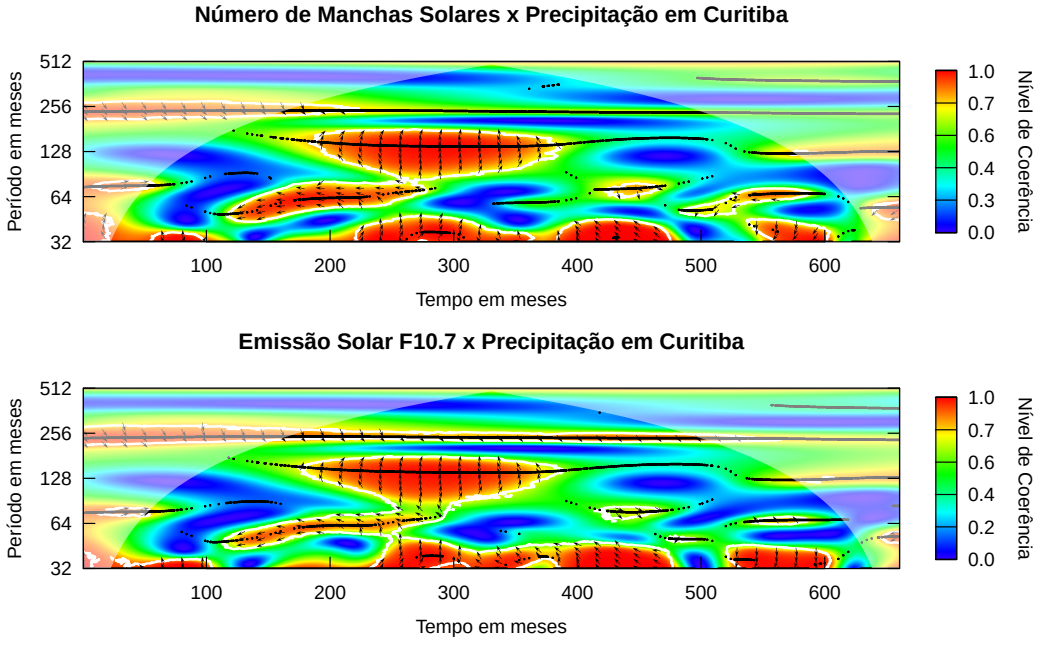


Figura 141 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Curitiba/PR e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

na relação Número de Manchas Solares/Precipitação, entre o mês 1 e 200, e na relação Emissão Solar F10.7/Precipitação, entre o mês 1 e 550. Em ambos os casos, as setas voltadas para o lado inferior direito indicam que elas variam em fase, durante esse tempo e para essa escala de período.

Para a periodicidade de 128 meses, a mancha avermelhada na porção central dos dois gráficos da figura 141 indicam um grau de coerência espectral próximo a 1 durante os

ciclos solares 20 e 21. A predominância de setas voltadas para o canto superior indicam que as séries variam com uma diferença de fase próxima a 90º. Já para as escalas de períodos entre 64 e 32 meses, observa-se algumas regiões com elevado nível de coerência, as quais se situam entre o mês 100 e o 600 dessa série.

4.7.3 Porto Alegre

Na figura 142 é mostrada a precipitação total mensal observada na cidade de Porto Alegre/RS, durante o período de estudo. Percebe-se pelo gráfico que a época de menores índices pluviométricos ocorreu durante o ciclo solar mais intenso dessa série, isto é, o ciclo solar 19, onde observou-se valores inferiores a 200 mm durante quase todo o tempo. A média suavizada manteve-se próximo a 120 mm até o ano de 1960, diminuindo para valores mais próximos a 80 mm durante o final desse ciclo. No decorrer do ciclo 20, a média suavizada aumenta de 80 para 120 mm, aproximadamente, e mantem-se acima de 100 mm durante o restante do ciclo. Nesse ciclo solar, observou-se picos 320 mm e 280 mm durante as fases inicial e final.

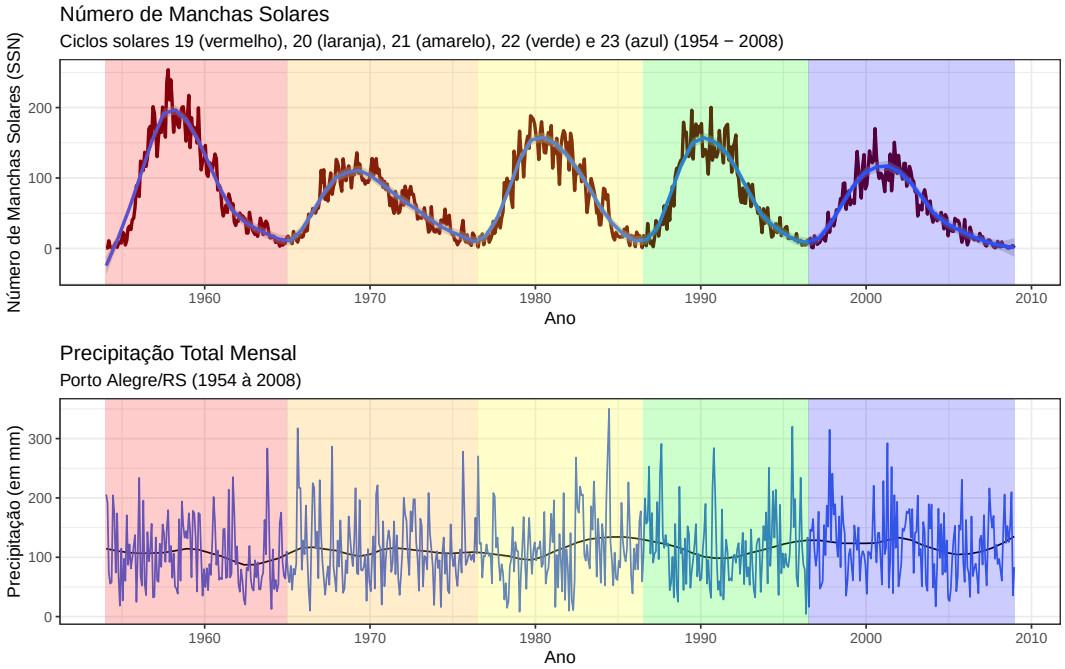


Figura 142 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Porto Alegre/RS

Quanto ao ciclo solar 21, observa-se que a média suavizada cresce de 100 para um pico de 140 mm, entre os anos de 1980 e 1990, uma vez que é durante esse intervalo que se observa os maiores índices pluviométricos de toda essa série. Quanto aos máximos sazonais, observa-se que eles variam entre 150 e 300 mm, com exceção de 1984, onde observa-se um pico de 350 mm. Durante o ciclo solar 22, percebe-se que a curva suavizada sofre

uma oscilação na qual ela atinge um mínimo próximo a 100 mm durante o máximo solar desse ciclo, seguido de um aumento para os níveis anteriores. Nesse intervalo, percebe-se que os máximos sazonais mantiveram-se entre 150 e 320 mm. Por fim, para o ciclo 23, observa-se que a curva suavizada passa por um ponto de mínimo, atingindo o nível de 100 mm, durante a fase de declínio desse ciclo. Semelhantemente ao observado no ciclo, observa-se que os picos anuais ficaram abaixo de 250 mm durante quase todo o tempo, com exceção do ano de 2002.

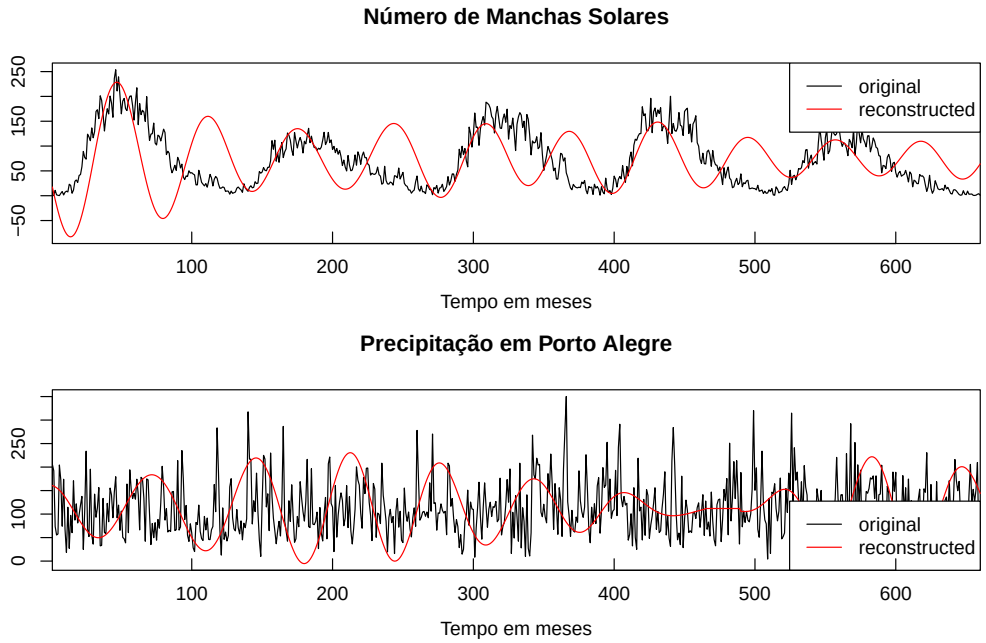


Figura 143 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Reconstituindo essa série para a periodicidade de 64 meses, observa-se níveis de potência relativamente altos durante os ciclos solares 19, 20, 21 e 23. No ciclo 22 observa-se uma descontinuidade na curva, indicando assim uma baixa potência para essa época. Analisando em paralelo com o Número de Manchas Solares, percebe-se que as duas reconstituições oscilam em oposição de fase durante todo o tempo, conforme mostra a figura 143.

Para a escala de período de 128 meses, a figura 144 apresenta níveis altos e moderados de potência Wavelet apenas nos ciclos 21 e 22. Nos demais, observa-se níveis baixos, conforme sugere a amplitude da curva de reconstrução. Durante essa época, onde a reconstituição apresenta amplitudes mais pronunciadas, percebe-se que as duas curvas mostradas nessa figura variam em oposição de fase.

Reconstruindo esses dados para a periodicidade de 256 meses, observa-se que a curva apresenta uma amplitude crescente com o passar do tempo, aumentando de

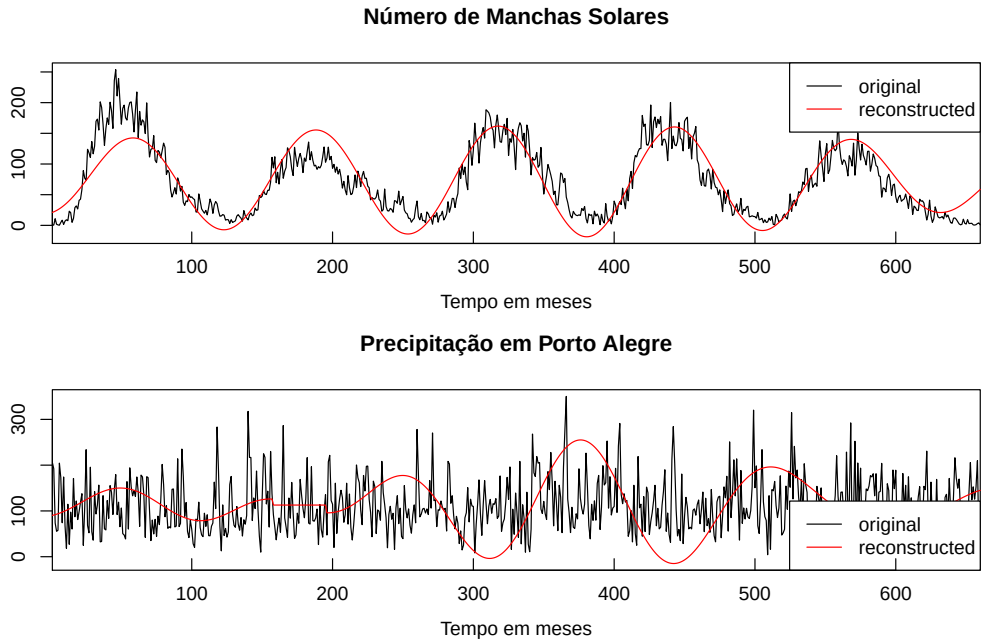


Figura 144 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

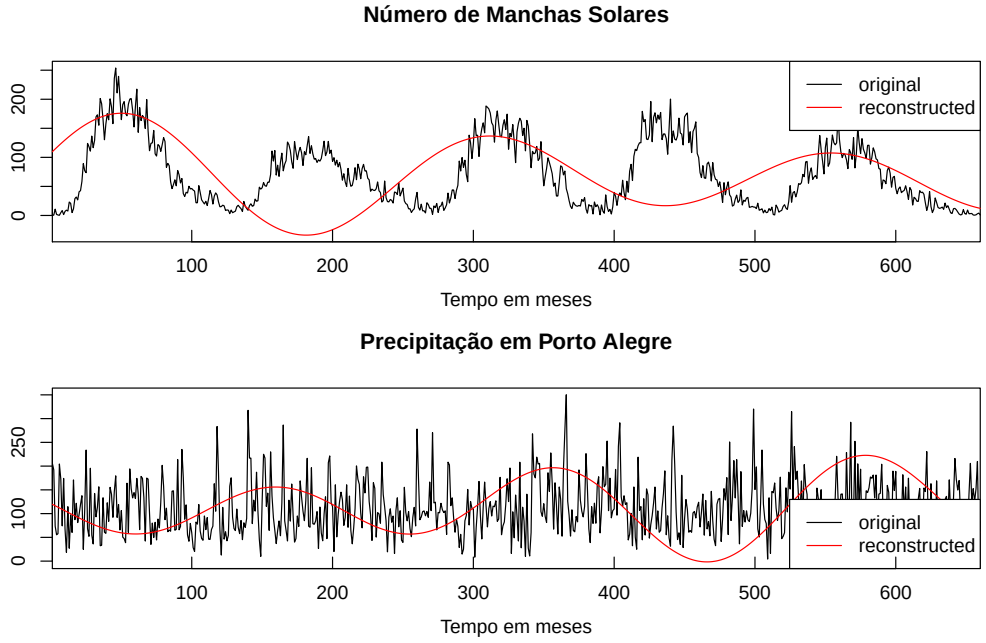


Figura 145 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Porto Alegre/RS (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

valores pequenos, durante os ciclos 19 e 20, para níveis mais moderados nos ciclos 22 e 23. Comparando com o Número de Manchas Solares, observa-se que as duas reconstituições variam em oposição de fase durante todo o tempo, conforme mostra a figura 145.

Aplicando a Análise de Coerência Wavelet entre a precipitação total em Porto

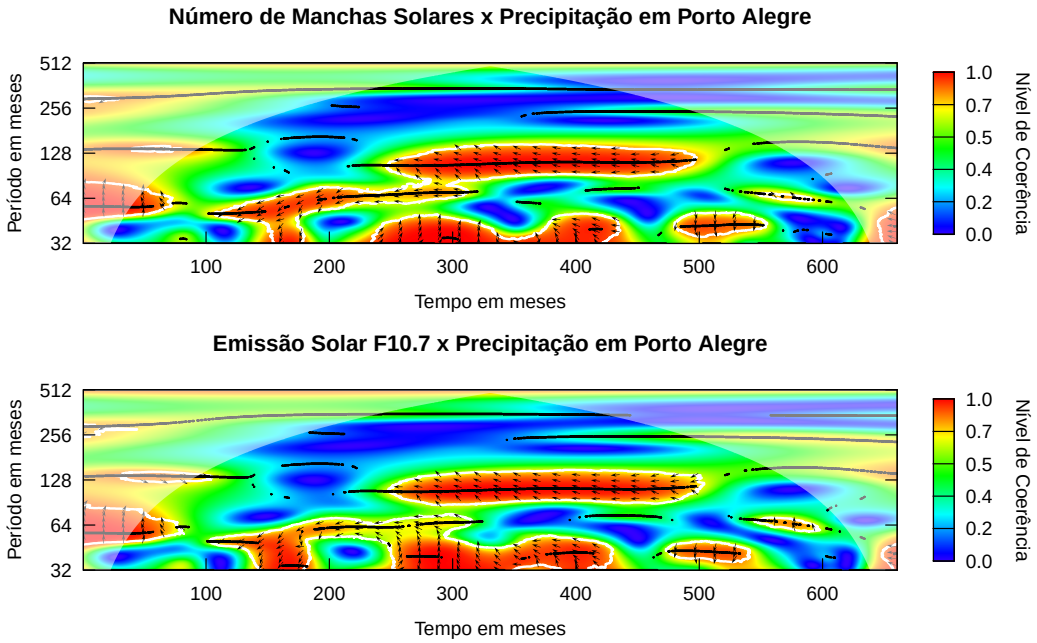


Figura 146 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Porto Alegre/RS e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

Alegre e o Número de Manchas Solares/Emissão Solar F10.7, observa-se níveis de coerência espectral próximo a 1, para a periodicidade de 128, durante os ciclos solares 21 e 22, conforme indica a mancha avermelhada presente na figura 146. Para essa região, a dominância de setas voltadas para o lado esquerdo indica que os índices de atividade solar estão em oposição de fase com a precipitação, confirmando assim os dados apresentados na figura 144. Para periodicidades entre 32 e 64 meses, níveis de coerência próximos a 1 podem ser observado em alguns intervalos isolados entre o mês 1 e 550. Nesses intervalos, as setas indicam ângulos de fase variando entre 90º e 270º.

4.7.4 Rio de Janeiro

Por fim, na figura 147 é mostrada a precipitação total e mensal observada na cidade do Rio de Janeiro, durante o período de estudo. Observa-se nesse gráfico que as maiores variações na curva suavizada ocorreram somente nos ciclos 19 e 20, onde observa-se um máxima em 1960 e um pico em 1966. Outro ponto a ser destacado nesse gráfico é que os maiores índices pluviométricos ocorreram durante os mínimos de atividade solar da década de 1960 e 1980, onde foram registrado índices superiores a 400 mm. Nos demais anos, observa-se valores abaixo dessa marca.

Reconstituindo essa série para a escala de período de 64 meses, observa-se uma baixa potência Wavelet durante quase todo o período, com exceção do intervalo entre o ciclo 19 e 20, onde foram observado uma amplitude mais elevada na reconstituição.

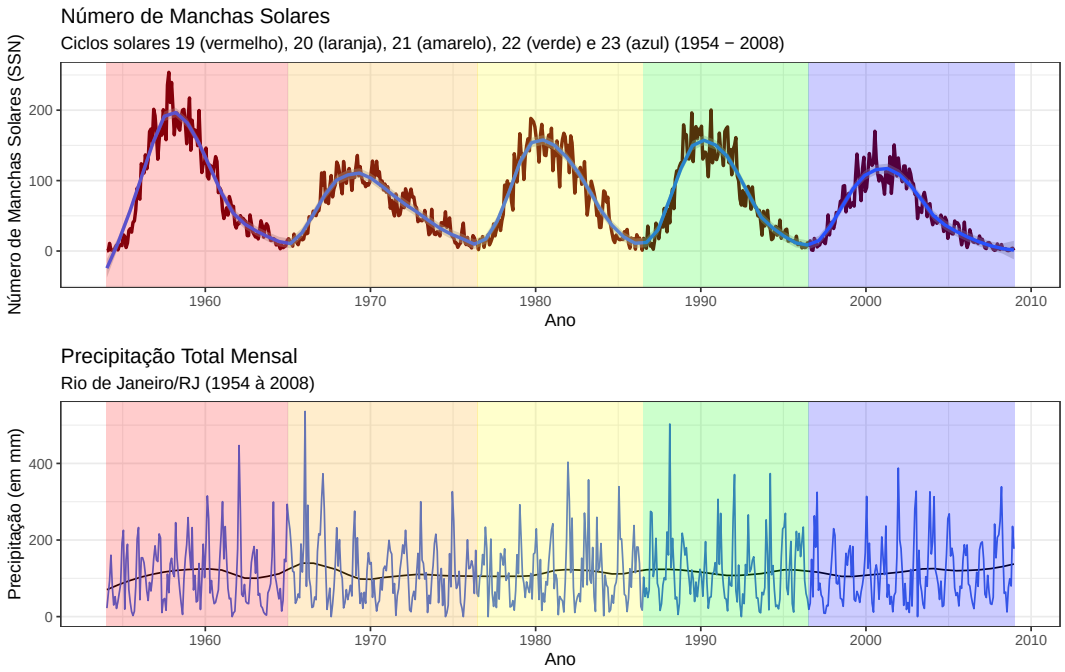


Figura 147 – Superior: Número Mensal de Manchas Solares. Inferior: Precipitação Total Mensal em Rio de Janeiro/RJ

Também nota-se uma descontinuidade durante o ciclo 22, conforme indica a figura 148. Nos ciclos 19, 20 e 21, observa-se que as reconstituições mostradas na figura variam em oposição de fase, enquanto que, nos dois ciclos subsequentes, variam em fase.

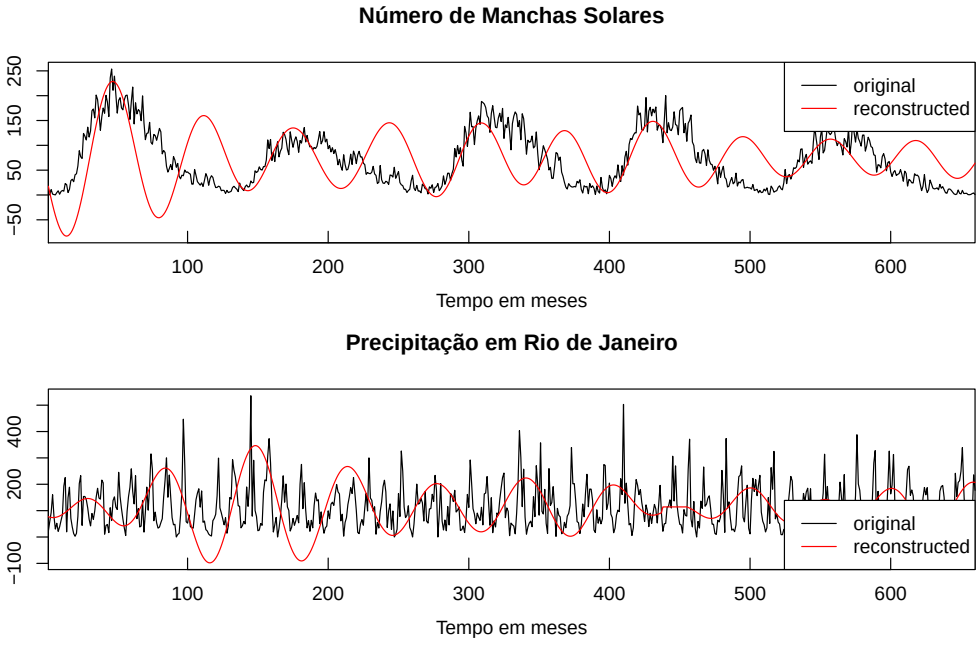


Figura 148 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro/RJ (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 64 meses (Fonte: o Autor).

Para a escala de período de 128 meses, a reconstituição dessa série apresenta níveis de potência moderados durante os ciclos 19 e 20, e níveis mais baixos nos demais ciclos.

Durante os ciclos 19 e 20, nota-se que as duas curvas mostradas na figura 149 variam em fase, enquanto que nos demais ciclos, em oposição de fase.

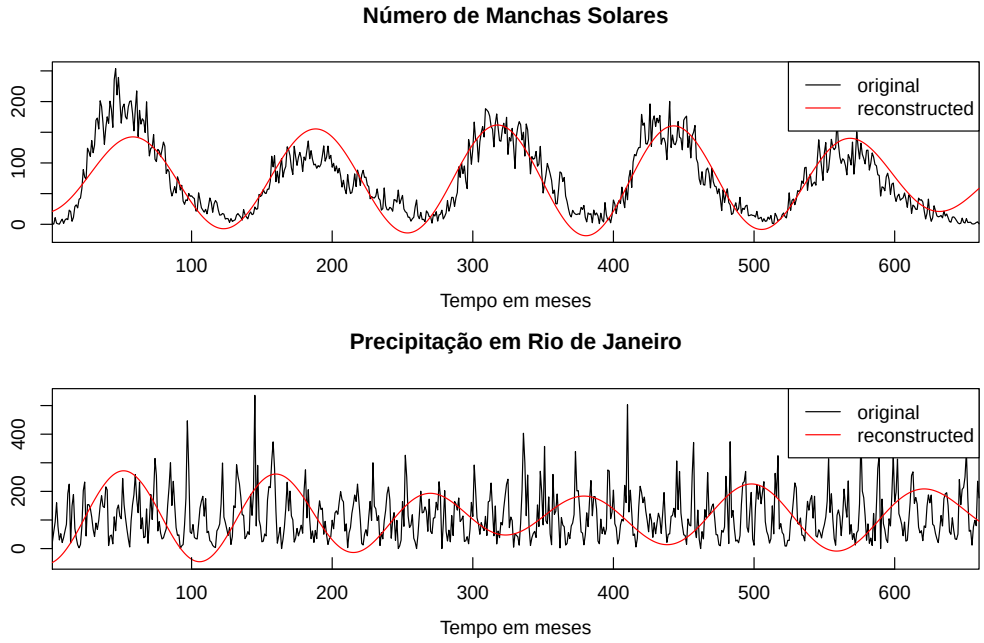


Figura 149 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro/RJ (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 128 meses (Fonte: o Autor).

Já para a escala de período de 256 meses, a reconstituição apresentada na figura 150 apresenta uma amplitude constante e baixa ao longo de todo o tempo de estudo. Comparando com o Número de Manchas Solares, percebe-se que ela varia em oposição de fase.

Por fim, na figura 151 tem-se as Análises de Coerência Wavelet entre os indicadores de atividade solar e a precipitação observada no Rio de Janeiro. Para a periodicidade de 256 meses, observa-se níveis de coerência espectral entre 0,7 e 1, (i) do ciclo 19 à 21 na relação Número de Manchas Solares e Precipitação; (ii) do ciclo 19 à 22, na relação Emissão Solar F10.7 e precipitação. Em ambos os casos, a predominância de setas voltadas para o lado superior indicam ângulo de fase próximo a 90º entre as séries e para essa escala de período.

Para a periodicidade de 128 meses, observa-se níveis de coerência espectral próximos a 1 durante a primeira metade do ciclo solar 19, e nos ciclos 22 e 23. Para o primeiro caso, as setas voltadas para o lado direito indicam uma variação em fase entre as duas séries. Já para os últimos dois ciclos, as setas voltadas para o lado superior esquerdo apontam para uma correlação negativa entre as séries. Para escalas de períodos entre 64 e 32 meses, observa-se a presença de alguns intervalos de tempo onde percebe-se níveis de coerência espectral próximos a 1, ao longo de todo o tempo de estudo.

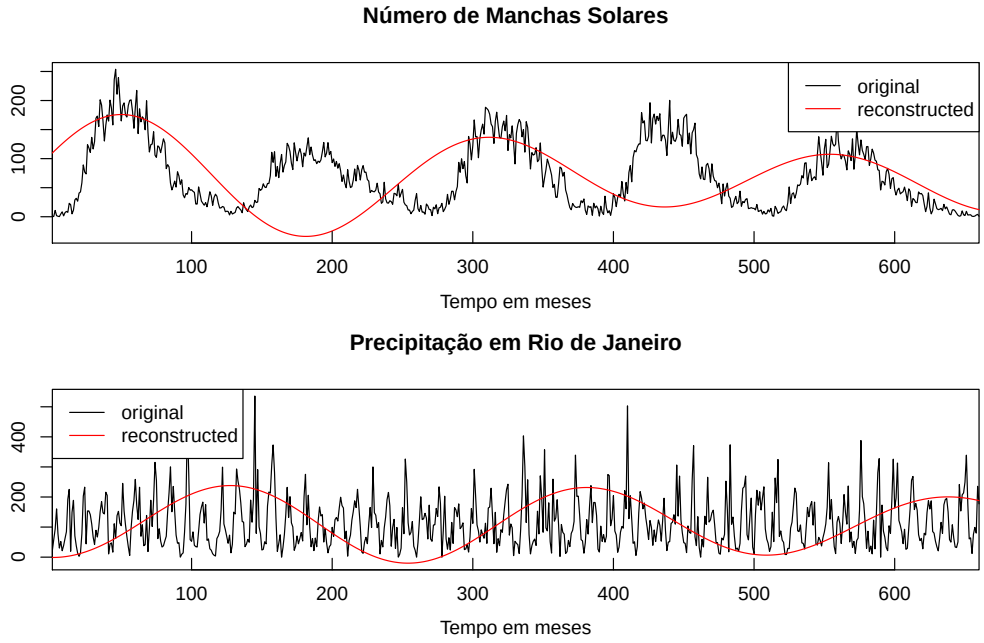


Figura 150 – Painel superior: Número de Manchas Solares (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (linha vermelha). Painel inferior: Cobertura de Nuvens em Rio de Janeiro/RJ (linha preta) e a sua reconstrução para a periodicidade de 256 meses (Fonte: o Autor).

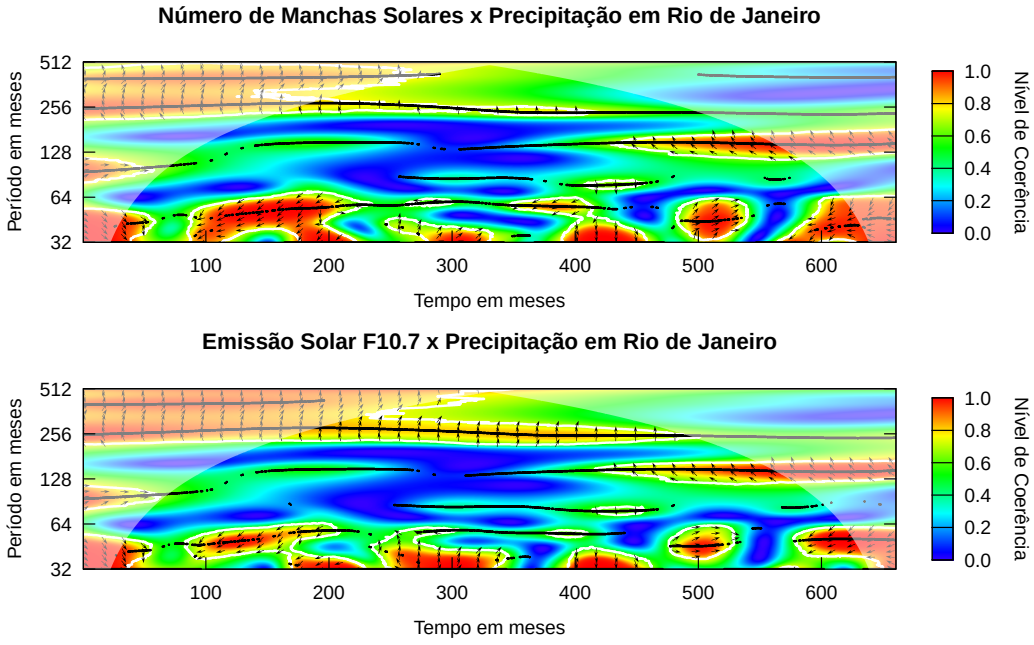


Figura 151 – Análises de Coerência Wavelet entre a Precipitação Total em Rio de Janeiro/RJ e Número de Manchas Solares (superior); Emissão Solar F10.7 (inferior) (Fonte: o Autor).

5 Considerações finais

Nesse capítulo é apresentado uma síntese geral dos resultados obtidos nessa pesquisa. Na primeira seção é apresentado um resumo sobre as relações entre os ciclos solares e fluxo de RCG, na segunda seção, um panorama geral sobre as influências dos ciclos solares as condições meteorológicas da região de estudo, e na terceira seção, algumas propostas para trabalhos futuros.

5.1 Ciclos Solares e fluxo de RCG

Na primeira fase desse trabalho, foram investigados os efeitos das variações no campo magnético solar sobre o fluxo de Raios Cósmicos Galácticos observado nos Centros de Monitoramento de Nêutrons de Hermanus e Potchefstroom. Embora esses CMN encontrem-se na África do Sul, os seus dados são válidos para a região de jurisdição da FIR-SBCW, uma vez que, ambas regiões estão localizadas dentro da faixa latitudinal próxima ao paralelo 30º Sul, e o movimento de rotação da Terra faz com que os dados registrados nessas duas estações sejam válidos para toda essa faixa latitudinal. A comparação visual dos gráficos mostrados nas figuras 29 e 31, assim como as Análises de Coerência Wavelet apresentadas nos painéis 30 e 32, permitiram concluir o seguinte:

1 Conforme previsto e comprovado por outros autores (e.g Belov, 2000), observa-se uma anticorrelação entre os índices de atividade solar e o fluxo de RCG dentro dessa faixa latitudinal, uma vez que os valores mais altos, referentes a contagem de partículas extraterrestres, foram registrados durante os mínimos solares. O valor mais elevado registrado em HRMS foi de, aproximadamente, 4600 partículas em meados de 1966. Já em PTFM, foi próximo à 2125 partículas em meados de 1988.

2 Existe uma influência direta do Ciclo de Hale no fluxo de RCG para essa faixa latitudinal. Concordando com o que fora observado por Frigo et al (2018), durante as transições dos ciclos solares pares para os ímpares (i.e do 20 para o 21 e do 22 para o 23) , observa-se que o máximo da curva referente ao fluxo de RCG possui uma forma mais achatada e semelhante a um platô. Já durante as outras transições, observa-se que a curva tem um máximo com perfil mais pontiagudo e semelhante a um pico.

3 Existe uma correlação intensa e negativa entre os índices de atividade solar e o fluxo de RCG, conforme mostram as Análises de Coerência Wavelet, comprovando assim que as variações no campo magnético solar interfere diretamente na quantidade de partículas cósmicas que penetram essa faixa latitudinal situada no Hemisfério Sul.

Embora outros autores já tenham comprovado essa correlação negativa, é importante ressaltar que, a maioria desses trabalhos concentram-se ou em escala global ou em latitudes do Hemisfério Norte, de modo que ainda há uma carência de trabalhos que mostre tal influência sobre o Hemisfério Sul. Devido a ausência de dados nas duas estações supracitadas, não foi possível realizar tal análise para todo o período proposto por esse trabalho.

5.2 Ciclos Solares e Variáveis Atmosféricas

Na segunda fase dessa pesquisa foram investigados os comportamentos das variáveis meteorológicas sobre alguns pontos da FIR-SBCW, assim como as suas correlações com os índices de atividade solar. Com exceção da série relativa à temperatura superficial média em Porto Alegre, todas as séries temporais apresentaram periodicidades nas escalas de 64, 128 e 256 meses. Quanto ao grau de coerência, observou-se:

1 Para a escala de período de 512 meses, ou 44 anos, observou-se elevados níveis de coerência entre as variáveis solares e a (i) temperatura superficial média nas quatro cidades; (ii) temperatura superficial máxima em Porto Alegre e Rio de Janeiro; (iii) temperatura superficial mínima em Curitiba; (iv) umidade relativa do ar nas quatro cidades; (v) cobertura de nuvens em Campo Grande e Rio de Janeiro; precipitação total em Campo Grande e Rio de Janeiro.

2 Para a sazonalidade de 256 meses, ou 22 anos, elevados níveis de coerência puderam, com relação aos índices de atividade solar, ser observados para (i) temperatura superficial média em Campo Grande, Curitiba e Porto Alegre; (ii) temperatura superficial máxima nas quatro cidades; (iii) umidade relativa do ar nas quatro cidades; (iv) cobertura de nuvens nas quatro cidades; (iv) precipitação total em Campo Grande, Curitiba e Porto Alegre.

3 Para a periodicidade de 128 meses, foram observados níveis significantes de coerência para todos os casos.

Diferente de trabalhos anteriores, como o Svensmark e Friis-Christensen (1997), observou-se nessa pesquisa o predomínio de correlações positivas entre os índices de atividade solar e a cobertura de nuvens. Tais resultados contradizem tanto pesquisas anteriores quanto o que era previsto para esse trabalho, uma vez que espera-se uma maior cobertura de nuvens durante os períodos de maiores fluxos de RCG. Contudo, vale ressaltar que a região de jurisdição esteve sob a influência da AMAS durantes os ciclos solares analisados nesse trabalho. Uma vez que AMAS provoca um enfraquecimento na rigidez de corte do campo geomagnético, é provável que essa correlação positiva se deva à ionização e conversão dos gases atmosféricos em núcleos de condensação através da interação entre esses gases e os Raios Cósmicos Solares, cujo fluxo é mais intenso durante os máximos solares, onde observa-se uma maior quantidade de explosões/erupções solares e ejeções de massa coronal.

É importante frisar que entre a década de 1960 e os anos 2000, a maioria das cidades brasileiras passaram por processos de urbanização e industrialização, que por sua vez provocam tanto o surgimento das "ilhas de calor", quanto o aumento na concentração de poluentes em suspensão na atmosfera. Tudo isso provoca alterações tanto nos regimes pluviométricos quanto na cobertura de nuvens, que por sua vez, alteram o equilíbrio radiativo da atmosfera, e por consequência, a variação térmica do ar.

5.3 Propostas para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõe-se:

1 Conforme visto nos resultados, observou-se níveis de coerência próximos a 1 para escalas de períodos de 44 anos, porém, devido a extensão temporal desse trabalho, os efeitos de borda devem ser levados em conta para tal escala. Diante disso, sugere-se uma análise em uma extensão temporal maior e onde os efeitos de borda podem ser desprezados.

2 Uma vez que foram observadas correlações positivas entre os índices de atividade solar e a cobertura de nuvens, sugere-se uma análise sobre a influência dos Raios Cósmicos Solares e a cobertura de nuvens sobre a região de jurisdição da FIR-SBCW, visando assim comprovar a hipótese levantada na seção anterior.

Referências

Assessoria Estatística; **Aviões - Sumário Estatístico 2010 - 2019.** Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Brasília. 2020.

AUSTIN, James M. Cumulus Convection and Entrainment. In: BYERS, H. R. et al. In: **Compendium of Meteorology.** 1ª Ed. American Meteorological Society, 1951.

BANCI, Darcy. **Meteorologia para aviação** - Teoria e testes. [s.n], 2013.

BEER, Jürg. **LONG-TERM INDIRECT INDICES OF SOLAR VARIABILITY.** Space Science Reviews 94: 53-66, 2000.

BELOV, Anatoly. **LARGE SCALE MODULATION: VIEW FROM THE EARTH.** Space Science Reviews 93: 79-105, 2000.

BHAT, C. K. **Cosmic-ray composition with TACTIC telescope using Fractal and Wavelet analysis**. Astroparticle Physics 38: 12 - 17, 2012.

BIWAS, Sukumar. **Cosmic perspective in space physic.** 1ª Ed. Dordrecht: Springer Science e Business Media: 2000.

BONCIOLI, Denise. **Cosmic ray composition studies with the Pierre Auger Observatory**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A 742: 22 - 28, 2014.

BOTHMER, Volker; ZHUKOV, Andrei. The Sun as the prime source of space weather. In: BOTHMER, Volker; DAGLIS, Ioannis A. **Space Weather** - Physics and Effects. 1ª Ed. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2007, P. 31 - 102.

BYERS, Horace R. Thunderstorms. In: BYERS, H. R. et al. **Compendium of Meteorology.** 1ª Ed. American Meteorological Society, 1951.

CHANDRA, Harish; BHATT, Beena. **Solares associated coronal mass ejection accompanied with DH type II radio burst in relation with interplanetary magnetic ?eld, geomagnetic storms and cosmic ray intensity**. New Astronomy Vol. 60 P. 22 - 32, 2018.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). **RELATÓRIO FINAL A-013/CENIPA/2017.** De 16 de Janeiro de 2018. Disponível em: <http://sistema.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/PR-SOM_-_19_01_2017_-_POR_VERSION_FINAL.pdf> Acesso em 10 de Março de 2022.

BRASIL. Departamento de Controle de Espaço Aéreo. Instituto de Cartografia Aeronáutica. **AIP Brasil de 19 de novembro de 2020.** Rio de Janeiro,2020.

BRASIL. Departamento de Controle de Espaço Aéreo. **ROTAER.** Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://aisweb.decea.gov.br/downloads/rotaer/rotaer_completo.pdf> acesso em: 12 de Janeiro de 2020.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. **Anuário do Transporte Aéreo:** Gráficos e tabelas - 2019. Rio de Janeiro, 2019.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. **Anuário do Transporte Aéreo:** Gráficos e tabelas - 2020. Rio de Janeiro, 2020.

BRASIL, Departamento de Controle de Espaço Aéreo. CINDACTA II (Vídeo Institucional). Youtube, 26 de Maio de 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=uEOpRx_hlYw&list=FLwI0qiMiXZf9hDNwv_KWFuw&index=7&t=386s>. Acesso em 14 de Janeiro de 2022.

BRASIL, Departamento de Controle de Espaço Aéreo. **CINDACTA II** - 2º Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/?i=unidades&p=cindacta-ii>. Acesso em: 14 de Janeiro de 2022.

CARPENEDO, Camila Bertoletti; AMBRIZZI, Tércio. **Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul Associado ao Modo Anular Sul e Impactos Climáticos no Brasil** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. 4, 605 - 613, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863540066>

CHARBONNEAU, Paul. **Dynamo Model of the Solar Cycle.** Living Rev. Solar Phys., **7**, (2010). Disponível em: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-3>. Acesso em 14 de Janeiro de 2022.

CROSBY, Norma B. Major radiation enviroments in the heliosphere and their implications for interplanetary travel. In: BOTHMER, Volker; DAGLIS, Ioannis A. **Space Weather** - Physics and Effects. 1ª Ed. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2007, P. 131 - 165.

CURRY, Judith A; WEBSTER, Peter J. **Thermodynamics of Atmospheres e Oceans.** 1ª Ed. San Diego/Califórnia: Academic Press, 1999.

DERECZYNSKI, Claudine Pereira; MENEZES, Wallace Figueiredo. Meteorology of the Campos Basin. In: Martins, R.P., GROSSMANN-MATHERSON, G.S. **Meteorology and Oceanography: regional environmental characterization of the Campos Basin, Southwest Atlantic.** 1ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 2, P. 1 - 54, 2017.

DERECZYNSKI, Claudine Pereira; OLIVEIRA, Juliana Silva de; MACHADO, Christiane Osório. **Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro.** Revista Brasileira de Meteorologia. Vol. 24, n.1 2009. P. 24 - 38.

DIEHL, R. et al.**The astrophysics of galactic cosmic ray.** Space Science Review. 99: 3 - 11, 2001.

DORMAN, Lev I. **Cosmic Rays in the Earth´s atmosphere and underground.** 1ª Ed. Nova York: Springer Science e Business Media: 2004.

EDDY, John A. **The Maunder Minimum:** The reign of Louis XIV appears to have been a time of real anomaly in the behavior of the sun. Science vol. 192 n. 4245, 1976.

FERNANDES, Ronabson Cardoso; LÚCIO, Paulo S.; FERNANDEZ, José H. **STUDY OF THE GALACTIC COSMIC RAYS AND SUNSPOT INFLUENCE OVER THE BRAZILIAN OF NORTHERN AND NORTHEASTERN PRECIPITATION.** In: FERNANDES, Ronabson Cardoso. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FORÇANTES CLIMÁTICAS NA PREVISÃO SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA AS REGIÕES NORTE E NORDESTE DO BRASIL.** *Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.* Natal/RN, 2018.

FERNANDES, Ronabson Cardoso. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS FORÇANTES CLIMÁTICAS NA PREVISÃO SAZONAL DE PRECIPITAÇÃO PARA AS REGIÕES NORTE E NORDESTE DO BRASIL.** *Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.* Natal/RN, 2018.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Aviation Weather** - For Pilots and Flight Operations Personnel. Asa, 1975.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Controlled Flight Into Terrain.** Disponível em: <https://www.faa.gov/news/safety_briefing/2018/media/SE_Topic_18-11.pdf.> Acesso em: 14 de janeiro de 2022.

FRANÇA, Valdeci Donizeti J.; QUEIROZ, Antônio Paulo de; Paulo R. Bastos de. **Nevoeiro em Porto Alegre - Preditores.** Disponível em: <https://redemet.decea.mil.br/old/uploads/2014/04/Nevoeiro_PortoAlegre.pdf> Acesso em 14 de Janeiro de 2022.

FLORINSKY, V; FERREIRA, S.E.S; POGORELOV, N.V. **Galactic Cosmic Rays in the Outter Heliosphere: Theory and Models**. Space Sci Rev. Vol. 176, P. 147 - 163, 2011.

FRIGO, Everton et al. **Effects of solar activity and galactic cosmic ray cycles on the modulation of the annual average temperature at two sites in southern Brazil.** Ann. Geophys., 36, 555-564, 2018. DOI: https://doi.org/10.5194/angeo-36-555-2018.

GULTEPE, Ismail et al. **A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology** Pure Appl. Geophys. **176**, 1869–1921 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02168-6>

HATHAWAY, David H. et al. **GROUP SUNSPOT NUMBERS: SUNSPOT CYCLE CHARACTERISTICS.** Solar Physics 211: 357-370, 2002.

HATHAWAY, David H. **The Solar Cycle**. Living reviews in Solar Cycle. Vol. 12, 2015.

HOWELL, Wallace E. The classification of cloud forms. In: BYERS, H. R. et al. **Compendium of Meteorology.** 1ª Ed. American Meteorological Society, 1951.

HOYT, Douglas V. SCHATTEN, Kenneth H. **Group Sunspot Numbers: A new Solar Activity reconstruction.** Solar Physics 179: 189 - 219, 1998.

HUNDHAUSEN, A. J. The Solar Wind. In: KIVELSON, Margaret G. RUSSEL, Christopher T. **Introduction to Space Physics.** 3ª Ed. São Paulo: Cambridge University Press, 1997. P. 91 - 128.

JUNGE, Christian. Nuclei of atmospheric condensation. In: BYERS, H. R. et al. **Compendium of Meteorology.** 1ª Ed. American Meteorological Society, 1951.

KARTTUNEN, Hannu et al. **Fundamental Astronomy** 6ª Ed. Verlag Berlim Heidelberg: Springer, 2017.

LABITZKE, Karin; LOON, Harry van. Solae effects in the middle and lower stratosphere and probable association with the troposphere. In: BOTHMER, Volker; DAGLIS, Ioannis A. **Space Weather** - Physics and Effects. 1ª Ed. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2007, P. 225 - 246.

LIOU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation.** 2ª Ed. USA: Elsevier Science, 2002.

MEWALDT, R. A. et al. **Radioactive clock and cosmic-ray transport in the galaxy.** Space Science Review. 99: 27 - 31, 2001.

MÖLLER, Fritz. Thermodynamics of clouds. In: BYERS, H. R. et al. In: **Compendium of Meteorology.** 1ª Ed. American Meteorological Society, 1951.

MOURA, Luciana Machado de; MARTINS, Fernando Ramos; ASSIREU, Arcilan Trevenzoli. **Variabilidade da cobertura de nuvens na cidade de São Paulo.** Revista Ambient. Água. Vol. 11 n. 4, Taubaté, 2016.

NTSB (2010). **NASDAC Review of National Transportation Safety Board (NTSB) weather-rellated accident (2003 - 2007).** Disponível em: <http://www.asias.faa.gov>. Acesso em: 15 de Setembro de 2021.

PORTUGAL, Willyamary. **Estudo da influência solar e cosmogênica na variabilidade da temperatura da superfície terrestre**. *Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* São José dos Campos, 2018.

PRIEST, E. R. The sun and its magntetohydrodinamics. In: **Introduction to Space Physics.** 3ª Ed. São Paulo: Cambridge University Press, 1997. P. 58-88.

PRUPPACHER, Hans R. The role of natural and anthropogenic pollutants in clouds and precipitation formation. In: RASOOL, S. I. **Chemistry of the Lower Atmosphere.** 1ª Ed. Nova York: Plenum Press, 1973.

RAMATY, R; LINGENFELTER, R. E; KOZLOVSKY, B. **Spallogenic light elements and cosmic-ray origin.** Space Science Reviews 99: 51 - 60, 2001.

RICHARDSON, J. D.; BURLAGA, L.F. **The Solar Wind in the Outer Heliosphere and Heliosheath** Space Sci Rev.Vol. 176, P. 217 - 235, 2011.

RÖSCH, Angi; SCHMIDBAUER, Harald. **WaveletComp 1.1: A guided tour through the R package.** Note = R package version 1.1, 2018. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>, acesso em 23 de agosto de 2021.

ROCHA, Ângela Fátima da. **ESPECTRO CRUZADO E COERÊNCIA WAVELET: UM ESTUDO DE VARIÁVEIS MICROMETEOROLÓGICAS EM FRAÇÕES URBANAS NA CIDADE DE CUIABÁ, MT.** *Tese de Doutorado, Universidade Federal do Mato Grosso.* Cuiabá/MT, 2018.

RUŽDJAK, Domagoj et al. **A relationship between the Solar Rotation and Activity Analysed by Tracing Sunspot Groups.** Solar Physics, vol. 292, p. 1-20, 2017. DOI:10.1007/s11207-017-1199-8.

SAHA, Kshudiram. **The Earth´s Atmosphere** - Its Physics and Dynamics. 1ª Ed. Verlag Berlin Heidelberg: Spinger, 2008.

SATYAMURTY, Prakki; NOBRE, Carlos A.; DIAS, Pedro L. Silva. South America. In: KOROLY, David J.; VINCENT, Dayton G. **Meteorology of the Southern Hemisphere.** American Meteorological Society, Vol. 27, N. 49, 1998.

SELUCHHI, Marcelo E. BEU, Cássia M. L. ANDRADE, Kelen M. **Características das frentes frias com potencial para provocar chuvas intensas na região serrana do Rio de Janeiro.** Revista Brasileira de Climatologia. Ano 12 - Vol. 18, 2016. P. 361 - 376.

SCHIFF, Harold I. Neutral Chemistry in the Earth´s Atmosphere. In: MCCORMAC, B. M. **Atmospheres of Earth and the Planets** 1ª Ed. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1975.

SHRIVASTAVA, Pankaj K.; JOTHE, Mulesk K.; SINGH, Mahendra. *Longitudinal Distribution of Solar Flares and Their Association with Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases* Solar Phys, 2011.

SONNEMAKER, João Baptista. **Metorologia** 30ª Ed. Editora Asa. São Paulo, 2009. ISBN: 978-85-86262-38-8

STULL, Rolland. **Meteorology for Scientist and Engineers**. 3ª ed. Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 2015.

SVENSMARK, Henrik; FRIIS-CHRISTENSEN, Eigil. **Variation of cosmic ray flux and global cloud covarage - a missing link in solar-climate relationship.** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 59, No. 11, pp. 1225-1232, 1997.

SVENSMARK, Henrik. **Cosmic Ray and Earth´s Climate**. Space Science Review. 93: 175 - 185, 2000.

TAPPING, K. F.; CHARROIS, D. P. **LIMITS TO THE ACCURACY OF THE 10.7 cm FLUX.** Solar Physics 150: 305-315, 1994.

TORRENCE, Christopher; COMPO, Gilbert P. **A Practical Guide to Wavelet Analysis.** Bulletin of the American Meteorological Society, 79(1): 62-78, 1997.

USOSKIN, I. G. et al. **Solar modulation parameter for cosmic rays since 1936 reconstructed from ground-based neutron monitors and ionization chambers.** Journal of Geophysical Research , Vol. 116, A02104, doi:10.1029/2010JA016105, 2011.

USOSKIN, I. G., Kovaltsov, G. A., Mironova, I. A., Tylka, A. J., and Dietrich, W. F.: **Ionization effect of solar particle GLE events in low and middle atmosphere**, Atmos. Chem. Phys., 11, 1979–1988, https://doi.org/10.5194/acp-11-1979-2011, 2011.

VICHARE, Geeta et al. **Equatorial secondary cosmic ray observatory to study space weather and terrestrial events**. Advances in Space Research. 61: 2555 - 2568, 2018.

VIEIRA, L. E. A., SILVA, L. A. **Geomagnetic modulation of clouds effects in the Southern Hemisphere Magnetic Anomaly through lower atmosphere cosmic ray effects.** Geophys. Res. Lett., 33 L14802, 2006, doi:10.1029/2006GL026389.

VOICULESCU, Mirela; USOSKIN, Ilya G.; MURSULA, Kalevi. **Different response of clouds to solar input.** GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, Vol. 33, L21802, doi: 10.1029/2006GL027820, 2006.

WIEDENBECK, M. E et al. **The origin of primary cosmic rays: Constraints from ACE elemental and isotropic composition observation.** Space Science Reviews 99: 15 - 26, 2001.