

# Influência da variação da Constante Solar na temperatura à superfície

Juan Ferreira<sup>(1)</sup>, Alfredo Rocha<sup>(2)</sup>, José Castanheira<sup>(3)</sup>

Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

<sup>(1)</sup>juan@ua.pt

<sup>(2)</sup>alfredo.rocha@ua.pt

<sup>(3)</sup>jcast@ua.pt

## 1. Introdução

Sendo o sol a fonte de energia de todo o sistema climático será certamente óbvio que variações na irradiância solar terão influência no clima da terra. Contudo, devido à não linearidade do sistema climático e às diversas interacções que existem dentro do sistema, ainda hoje não é claro como é que a variação da radiação solar que chega ao topo da atmosfera influencia o clima do nosso planeta.

Existem dois métodos para estudar a influência do sol no clima, o primeiro método é usando modelos climáticos tais como modelos de balanço energético ou modelos de circulação geral, outro método é tentar encontrar directamente o sinal do ciclo solar nos dados de temperatura através de estudos de correlação e de regressão (Haigh, 2003). Ambos os métodos têm vantagens e desvantagens. A vantagem dos métodos que envolvem modelos climáticos é a de se conseguir controlar a experiência, controlando os vários forçamentos de forma a estudar apenas as alterações climáticas devidas a variações no forçamento solar; a desvantagem destes métodos é que, como não se conhecem completamente os mecanismos do forçamento solar, não se consegue fazer um estudo completamente fidedigno da influência da actividade solar no clima da terra. A vantagem de tentar estimar a sensibilidade do clima ao ciclo solar usando dados observados da temperatura global é a de avaliar os efeitos totais do acoplamento Clima-Sol sem necessidade de um conhecimento muito detalhado dos processos físicos e químicos; a desvantagem desta abordagem vem do facto de ser muito difícil filtrar os dados de forma a extrair apenas a componente de variabilidade relativa às alterações na irradiância solar.

O problema da influência da variação da actividade solar no clima terrestre começa logo nos dados da radiação solar. Scafetta e West (2005) dão conta deste mesmo problema, quando comparam os valores da irradiância total solar (TSI, Total Solar Irradiance) obtidos em dois estudos com observações a bordo de satélites, os dados PMOD de Frohlich e Lean (1998) e os dados ACRIM devidos a Wilson e Mardinov (2003). A diferença entre estes

dois conjuntos de dados resulta de uma tendência de 0.047%/década entre 1980 a 2002 no conjunto ACRIM e nenhuma tendência entre o conjunto PMOD. Segundo Scafetta e West (2005), esta tendência evidenciada nos dados ACRIM resultaria numa contribuição de entre 10-30% do aquecimento global observado no período entre 1980 e 2002, enquanto outros autores que usam o conjunto de dados PMOD (secção 2.9.5 de Forster *et al.* (2007)) não detectam qualquer contribuição devido à variação solar.

Além da influência de carácter global destas interacções entre a actividade solar e o clima da terra, existem relatos de influências locais, por variabilidade de padrões de larga escala da atmosfera que se modifica e que provocam alterações locais mais acentuadas. Shindell *et al.* (2001) refere que desde o fim do mínimo de Maunder (período irradiância solar mínima nos últimos 1000 anos, entre os finais do século XVI e início do século XVIII) as mudanças de temperatura global são pequenas (entre 0.3 e 0.4 K), tanto em resultados de modelos climáticos como em reconstruções empíricas do clima global da altura, contudo as mudanças de temperatura na Europa chegaram a 1-2 K. Segundo este autor, isto deve-se ao facto de, com a irradiância solar mais baixa, o índice AO/NAO estar enviesado para os valores mais baixos, o que faz com que a temperatura sobre os continentes do hemisfério norte seja mais baixa, sobretudo no inverno.

Numa coisa parece haver consenso, o aumento de temperatura dos últimos 30 anos não é devido apenas a variações na irradiância solar. As simulações com modelos globais e com modelos de balanço energético chegam a aumentos de temperatura devido à actividade solar abaixo da observada, chegando a explicar, no máximo, cerca de 30% do aquecimento observado (Scafetta e West, 2005; Lean e Rind, 1998; Haigh, 2003).

Neste trabalho não se pretende avaliar a contribuição da variabilidade solar nas alterações climáticas, mas fazer uma caracterização da temperatura à superfície da terra entre situações de máximo solar e de mínimo solar. Pretende-se

também recriar a situação de mínimo de Maunder e ver o que aconteceria, se a irradiância solar aumentasse para valores iguais, em módulo, à diminuição do mínimo de Maunder.

Na secção 2, apresenta-se uma breve descrição das características do modelo usado e das experiências realizadas. Na secção 3, analisam-se os resultados das simulações e na secção 4 resumem-se os resultados deste trabalho.

## 2. Métodos

O modelo de circulação geral usado neste trabalho foi o Model II da NASA/Goddard Space Flight Center (Hansen *et al.*, 1983). Trata-se de um modelo que resolve as equações de conservação de momento, de massa e de energia, em que se admite a aproximação hidrostática. O modelo tem uma resolução horizontal de  $8^\circ \times 10^\circ$  (latitude  $\times$  longitude) e nove camadas na vertical. O topo da atmosfera é fixa na pressão 10 hPa. Foi usado o modo oceânico chamado *qflux*, muito simples, que permite que o oceano se ajuste à temperatura do ar, trata-se de um modelo de balanço energético para o oceano uma vez que não existem correntes (não existe transporte de massa), existindo apenas transporte de energia de cada célula do modelo para outra, de acordo com um fluxo energético previamente estabelecido e que simula o efeito das correntes.

Foram feitas 5 simulações de 30 anos em que apenas se variou o valor da constante solar com o objectivo de avaliar a sensibilidade da atmosfera à variação da irradiância solar. Mantiveram-se os forçamentos devidos aos gases de efeito de estufa num valor de referência (no nosso caso no valor observado no ano de 1960), as concentrações destes gases podem ser observados na tabela 1. Fez-se uma simulação de referência de trinta anos com o valor da constante solar observada em 1960. Fizeram-se duas simulações de trinta anos, diferindo a irradiância de  $\pm 0,05\%$  em relação ao valor de referência, uma vez que de acordo com Camp e Tung (2007) a variação entre o mínimo solar e o máximo solar é de aproximadamente  $0,1\%$ . Fez-se uma quarta simulação de trinta anos cuja irradiância diminui  $0,25\%$  em relação ao valor de referência, uma vez que a irradiância no mínimo de Maunder seria desta ordem de grandeza. Finalmente, realizou-se ainda uma simulação em que se aumentou a irradiância solar em  $0,25\%$  em relação ao valor de referência, de forma a avaliar de que forma o clima da terra responderia a valores extremos de irradiância, a esta simulação chamamos “máximo de Maunder”. Um resumo esquemático das simulações encontra-se na tabela 1, onde se pode verificar que as alterações da constante solar variam entre aproximadamente  $0,6 \text{ W/m}^2$ , nas simulações de máximo solar e mínimo solar, e aproximadamente  $3$

$\text{W/m}^2$  nas simulações de máximo e mínimo de Maunder.

**Tabela 1.** Concentrações de gases de efeito de estufa e irradiâncias utilizadas.

	CO2 (ppm)	N2O (ppm)	CH4 (ppm)	CFC11 (ppt)	I ( $\text{W/m}^2$ )
Referência	316,5	0,2964	1,247	0,0107	1366,2941
Máximo Solar	316,5	0,2964	1,247	0,0107	1366,9772
Mínimo Solar	316,5	0,2964	1,247	0,0107	1365,6113
Máximo de Maunder	316,5	0,2964	1,247	0,0107	1369,7098
Mínimo de Maunder	316,5	0,2964	1,247	0,0107	1362,8869

## 3. Resultados

Fez-se a análise das médias anual e sazonal dos desvios em relação à simulação de referência da temperatura para cada um dos cenários referidos no final da secção anterior. Nos mapas que se mostram a seguir, os valores representados são os desvios Tcen-Tref, ou seja, valores positivos indicam aumento da temperatura em relação à simulação de referência e valores negativos indicam arrefecimento em relação à simulação de referência.

### a) Mínimo solar

Durante o período de mínimo solar observa-se uma diminuição da temperatura média anual global de cerca de  $0,09^\circ\text{C}$ , que é um valor muito pequeno, embora passe o teste de significância ao nível de  $99\%$ . A figura 1 representa a distribuição dos desvios da temperatura média anual, e embora a temperatura média global diminua muito pouco, existem variações regionais com arrefecimentos da ordem dos  $0,8^\circ\text{C}$  nas latitudes médias do hemisfério norte. Existem regiões que, apesar da diminuição da irradiância solar, sofrem aumentos de temperatura, como é o caso a norte das ilhas do Hawai, no oceano Pacífico, em que existe um aumento de temperatura significativo para todas as estações do ano, no entanto, estes aumentos são muito localizados, e seria necessário avaliar o seu significado estatístico tendo em conta o efeito multiplicidade. De referir também que a diminuição de temperatura é mais significativa no Hemisfério Norte ( $0,12^\circ\text{C}$ ) do que no Sul ( $0,06^\circ\text{C}$ ). Este comportamento observa-se tanto na média anual como nas médias sazonais (figuras 2 a 5). Na tabela 2 apresenta-se um resumo destes valores.

É no inverno que se observam maiores descidas de temperatura, sobretudo na América do Norte e no Norte de Ásia (figura 2). Observa-se uma descida de temperatura acentuada no hemisfério sul junto ao Estreito de Magalhães e um aumento de temperatura na cintura circundante da Antártida, sobretudo no Verão (figura 4, Inverno do HS) e no Outono (figura 5), mas com pouco significado estatístico.

**Tabela 2.** Quadro resumo das variações da temperatura média anual e por estações (Tcen-Tref), para o cenário de mínimo solar. Valores marcados com \*\*\* são significativos ao nível de 0,01. Valores marcados com \*\* são significativos ao nível de 0,05. Valores marcados com \* são significativos ao nível de 0,1.

	Global (°C)	HN (°C)	HS (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)
<b>Anual</b>	-0,09***	-0,12***	-0,06*	-0,94***	1,22***
<b>Inverno</b>	-0,14***	-0,20***	-0,09***	-2,15***	1,46***
<b>Primavera</b>	-0,09***	-0,10**	-0,08**	-1,31***	1,24***
<b>Verão</b>	-0,05*	-0,07***	-0,03	-1,89***	1,94***
<b>Outono</b>	-0,10***	-0,14***	-0,06	-1,99***	2,39***

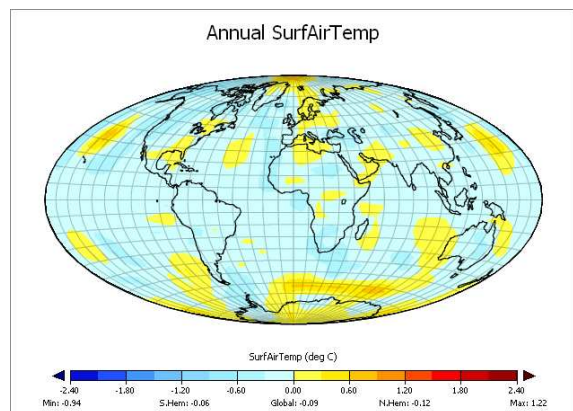


Figura 1. Desvios da temperatura média anual entre Tcen – Tref no cenário de mínimo solar.

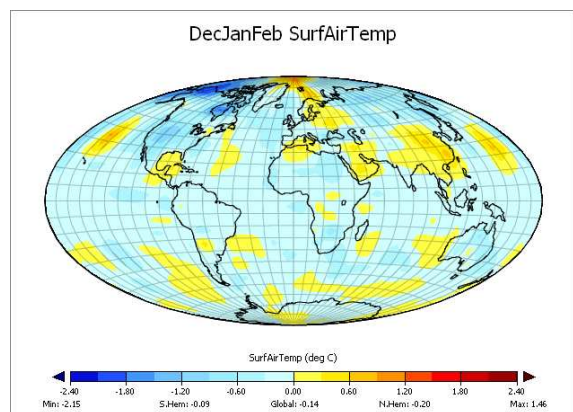


Figura 2. Desvios da temperatura média de inverno entre Tcen - Tref no cenário de mínimo solar.

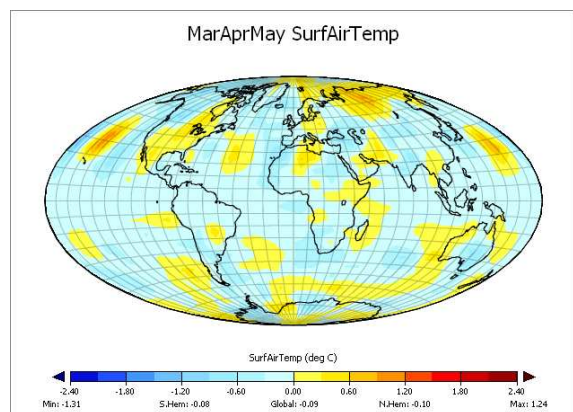


Figura 3. Desvios da temperatura média de primavera entre Tcen - Tref no cenário de mínimo solar.

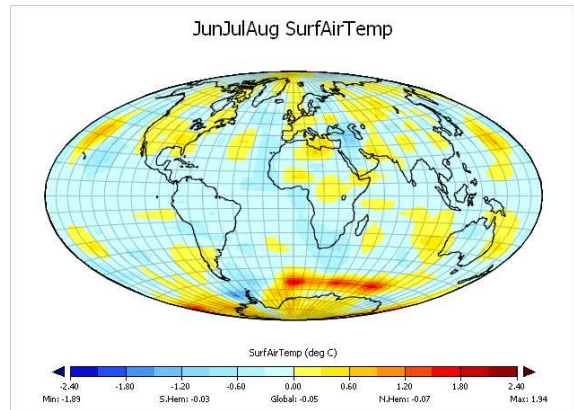


Figura 4. Desvios da temperatura média de verão entre Tcen - Tref no cenário de mínimo solar.

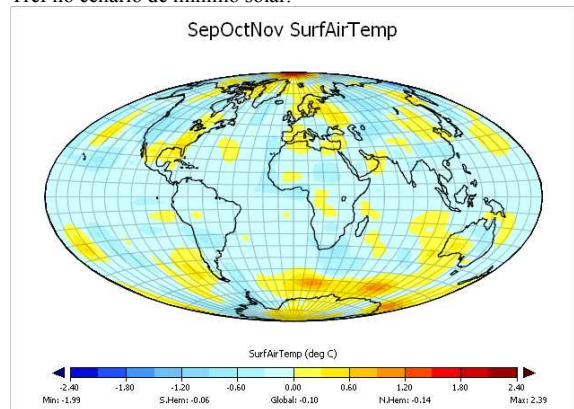


Figura 5. Desvios da temperatura média de outono entre Tcen - Tref no cenário de mínimo solar.

## b) Máximo Solar

Durante o período de máximo solar observa-se um aumento da temperatura média anual global de cerca de 0,08 °C, que é um valor muito pequeno, embora significativo. Tal como no caso do mínimo solar, existem regiões onde as variações são elevadas (figura 6), como no norte da Europa e no Oceano Índico, em que os aumentos de temperatura chegam a ser de cerca de 1 °C. Existem regiões onde, apesar do aumento da irradiância solar, a temperatura tende a diminuir, o caso mais significativo é a sul do continente africano, onde as temperaturas diminuem até cerca de 0,5 °C. De referir também que a temperatura aumenta mais no Hemisfério Norte (0,11 °C) do que no Sul (0,05 °C) e que os aumentos de temperatura no hemisfério sul não passam os testes de significância estatística. Este comportamento observa-se tanto na média anual como nas médias sazonais (figuras 7 a 10). Na tabela 3 apresenta-se um resumo destes valores tanto na média anual como na média sazonal.

É no inverno que se observam maiores aumentos de temperatura, sobretudo na América do Norte e no Centro e Norte da Europa. Observa-se uma descida de temperatura acentuada no hemisfério sul junto ao Estreito de Magalhães e um aumento de temperatura nas regiões vizinhas sobretudo no Verão e no Outono.



**Tabela 3.** Quadro resumo das variações da temperatura média anual e por estações (Tcen-Tref) para o cenário de máximo solar. Valores marcados com \*\*\* são significativos ao nível de 0,01. Valores marcados com \*\* são significativos ao nível de 0,05. Valores marcados com \* são significativos ao nível de 0,1.

	Global (°C)	HN (°C)	HS (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)
<b>Anual</b>	0,08***	0,11***	0,05	-0,63***	1,09**
<b>Inverno</b>	0,08***	0,14***	0,03	-0,89***	2,11***
<b>Primavera</b>	0,08**	0,10***	0,05	-0,88***	1,52***
<b>Verão</b>	0,09***	0,11***	0,07	-1,13**	2,04***
<b>Outono</b>	0,07**	0,10***	0,04	-0,96***	2,09***

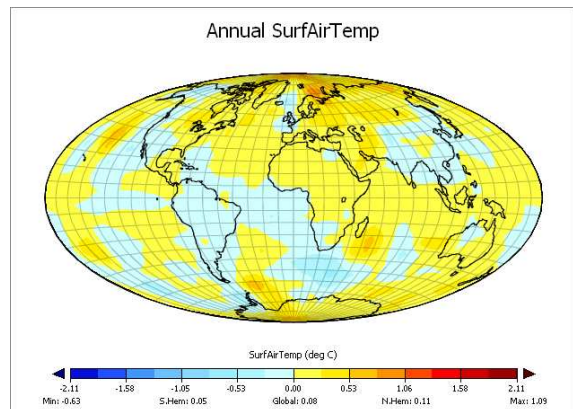


Figura 6. Desvios da temperatura média anual entre Tcen - Tref no cenário de máximo solar.

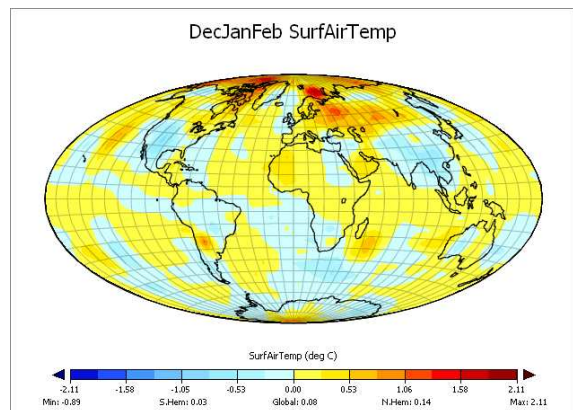


Figura 7. Desvios da temperatura média de inverno entre Tcen - Tref no cenário de máximo solar.

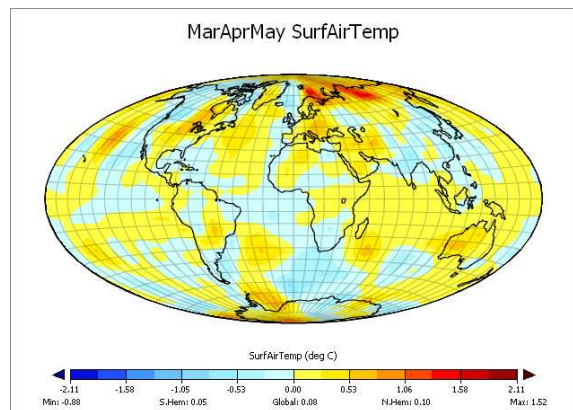


Figura 8. Desvios da temperatura média de primavera entre Tcen - Tref no cenário de máximo solar.

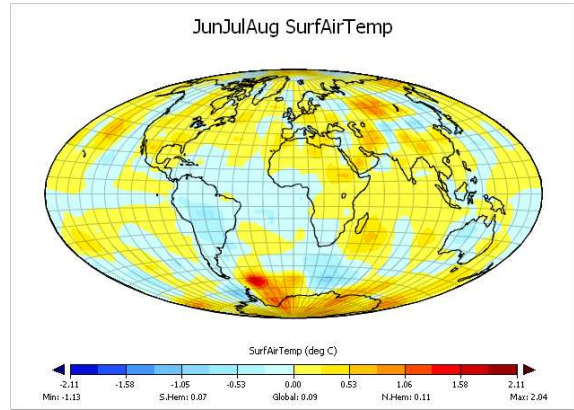


Figura 9. Desvios da temperatura média de verão entre Tcen - Tref no cenário de máximo solar.

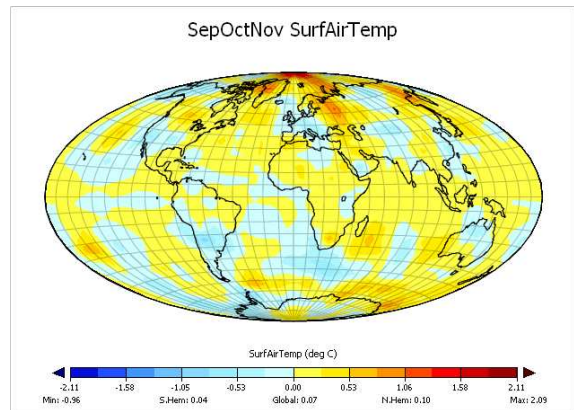


Figura 10. Desvios da temperatura média de outono entre Tcen - Tref no cenário de máximo solar.

### c) Mínimo de Maunder

Nos resultados da simulação do mínimo de Maunder observa-se a tendência de diminuição de temperatura em relação à simulação de referência tal como também já tinha sido observado na simulação de mínimo solar, contudo os valores de variação são muito mais elevados. Observa-se uma diminuição da temperatura média anual global de cerca de 0,4 °C (figura 11), que está de acordo com outros estudos feitos sobre este período (Rind *et al.*, 1999, Shindell *et al.*, 2001). Existem ainda variações regionais que apresentam arrefecimentos da ordem de 1 °C, embora no oeste da Europa não parece haver alterações significativas. Neste caso, a diferença entre o arrefecimento do Hemisfério Norte e do Hemisfério Sul não é tão significativa, acontece até que nos meses de Verão (JJA) o Hemisfério Sul arrefece mais que o Norte (tabela 4).

É no Inverno que se observam maiores descidas de temperatura, sobretudo na América do Norte e no Norte da Europa (figura 12). Observa-se uma descida de temperatura acentuada no hemisfério sul junto ao Estreito de Magalhães e no Índico sul durante o verão (figura 14). A primavera acaba por ser a estação cujas diferenças com a situação de referência são menores (figura 13). No Outono a padrão passa a ser parecido com o Inverno, arrefecimento elevado na América do Norte, Atlântico Norte e no Norte da Europa de Leste.

As figuras 11 a 15 apresentam diferenças de temperatura significativas em quase todos os pontos.

**Tabela 4.** Quadro resumo das variações da temperatura média anual e por estações (Tcen-Tref) para o cenário de mínimo de Maunder. Valores marcados com \*\*\* são significativos ao nível de 0,01. Valores marcados com \*\* são significativos ao nível de 0,05. Valores marcados com \* são significativos ao nível de 0,1.

	Global (°C)	HN (°C)	HS (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)
<b>Anual</b>	-0,40***	-0,42***	-0,37***	-1,51***	1,40***
<b>Inverno</b>	-0,40***	-0,50***	-0,31***	-2,64***	1,97***
<b>Primavera</b>	-0,38***	-0,38***	-0,38***	-1,74***	1,07**
<b>Verão</b>	-0,39***	-0,35***	-0,43***	-3,94***	0,91*
<b>Outono</b>	-0,41***	-0,46***	-0,36***	-2,62***	1,65***

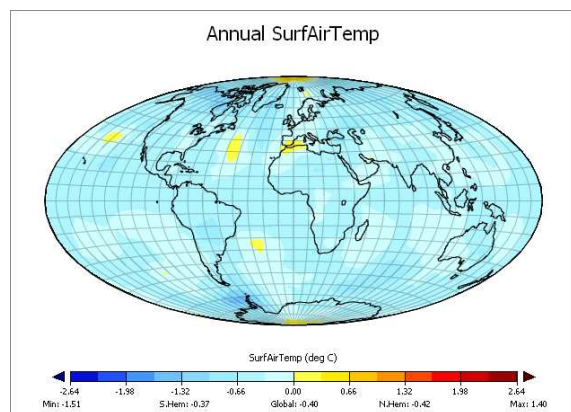


Figura 11. Desvios da temperatura média anual entre Tcen - Tref no cenário de mínimo de Maunder.

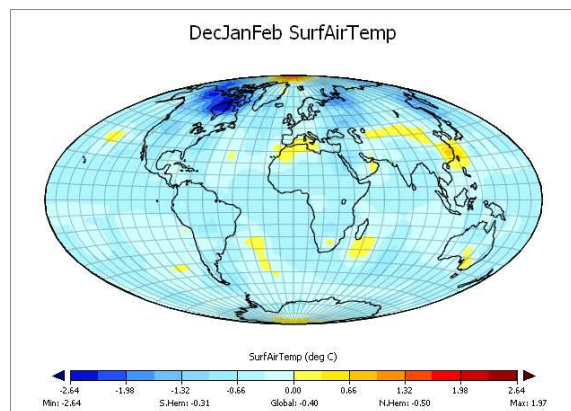


Figura 12. Desvios da temperatura média de inverno entre Tcen - Tref no cenário de mínimo de Maunder.

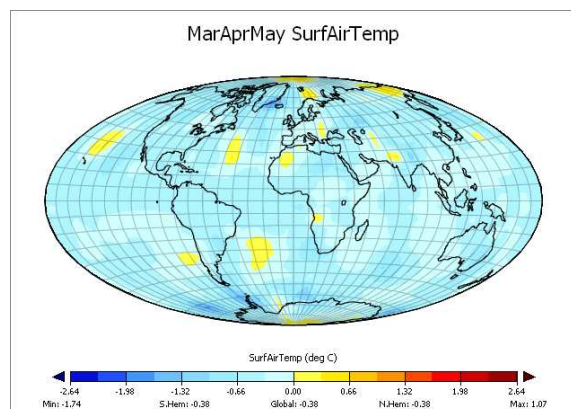


Figura 13. Desvios da temperatura média de primavera entre Tcen - Tref no cenário de mínimo de Maunder.

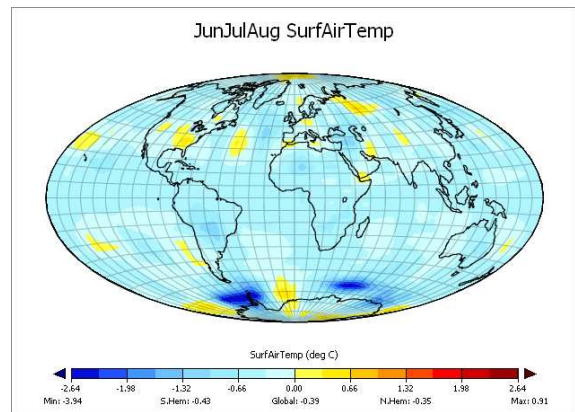


Figura 14. Desvios da temperatura média de verão entre Tcen - Tref no cenário de mínimo de Maunder.

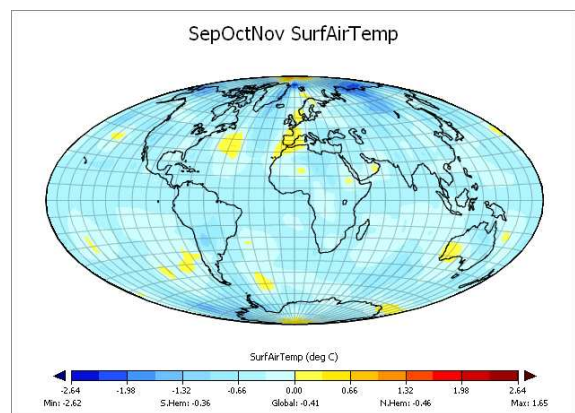


Figura 15. Desvios da temperatura média de outono entre Tcen - Tref no cenário de mínimo de Maunder.

#### d) Máximo de Maunder

Tal como seria de esperar, a temperatura nesta simulação é superior à temperatura da simulação de referência (0,38 °C) e com um valor aproximado, mas com sinal contrário, ao que se chega na simulação de mínimo de Maunder. Localmente acontecem variações de temperatura mais elevadas, como o que acontece perto da Antártida, em que a temperatura pode subir acima de 1 °C em relação à temperatura da simulação de referência. Na tabela 5 encontram-se resumidas as principais variações, a nível global e por hemisfério, desta simulação em relação à simulação de referência. Uma característica, que torna esta simulação diferente das referidas nos pontos anteriores, é o facto das maiores variações se registarem no Hemisfério Sul (tabela 5). Embora as diferenças com o Hemisfério Norte não sejam muito elevadas, o que acontece é que o Hemisfério Sul aquece mais do que o Hemisfério Norte, tanto na temperatura média anual como na média sazonal, com excepção do Inverno (DJF).

É no Verão que se observam as maiores subidas da temperatura (figura 19), sobretudo no extremo sul dos oceanos Atlântico, Índico e Pacífico, a rodear a Antártida. É no Inverno e no Outono, figura 17 e



20, respectivamente, que se observam as maiores variações regionais no Hemisfério Norte com forte aquecimento perto da Gronelândia e elevado arrefecimento nas regiões continentais da América, Europa e Ásia. Na Primavera, figura 18, observa-se um forte aquecimento na região da Gronelândia, no Atlântico Sul e no Norte da Europa e da Ásia.

**Tabela 5.** Quadro resumo das variações da temperatura média anual e por estações (Tcen-Tref) para o cenário de máximo de Maunder. Valores marcados com \*\*\* são significativos ao nível de 0,01. Valores marcados com \*\* são significativos ao nível de 0,05. Valores marcados com \* são significativos ao nível de 0,1.

	Global (°C)	HN (°C)	HS (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)
<b>Anual</b>	0,38***	0,36***	0,40***	-0,21	1,88***
<b>Inverno</b>	0,35***	0,37***	0,33***	-0,66**	2,40***
<b>Primavera</b>	0,39***	0,38***	0,41***	-0,41*	1,89***
<b>Verão</b>	0,41***	0,34***	0,47***	-0,74***	3,97***
<b>Outono</b>	0,37***	0,35***	0,40***	-0,77**	3,21***

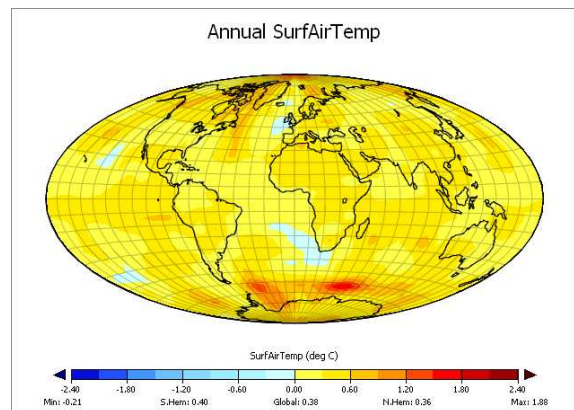


Figura 16. Desvios da temperatura média anual entre Tcen - Tref no cenário de máximo de Maunder.

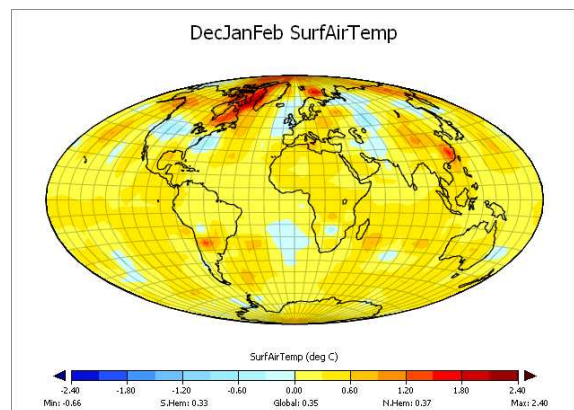


Figura 17. Desvios da temperatura média de inverno entre Tcen - Tref no cenário de máximo de Maunder.

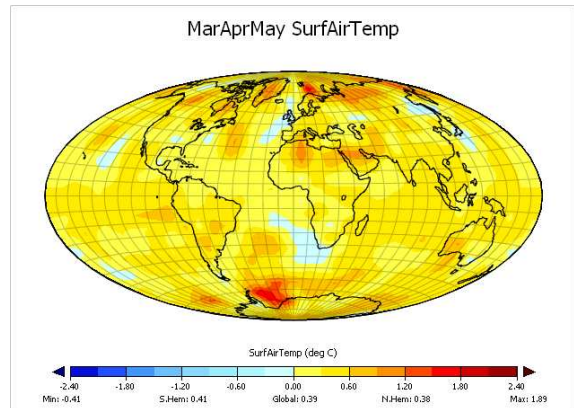


Figura 18. Desvios da temperatura média de primavera entre Tcen - Tref no cenário de máximo de Maunder.

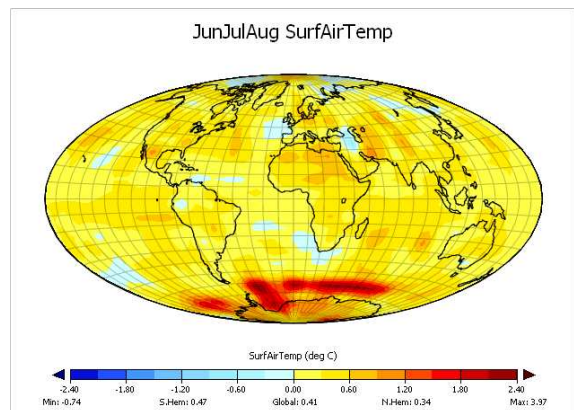


Figura 19. Desvios da temperatura média de verão entre Tcen - Tref no cenário de máximo de Maunder.

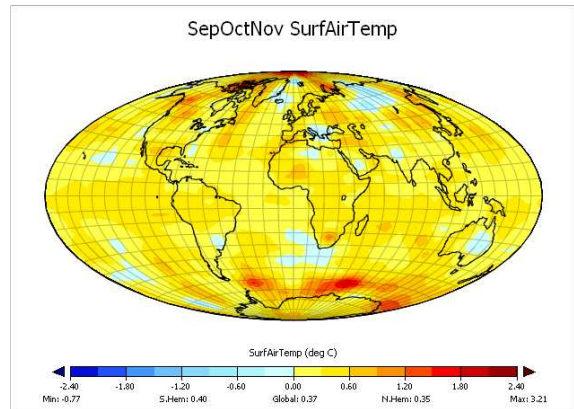


Figura 20. Desvios da temperatura média de outono entre Tcen - Tref no cenário de máximo de Maunder.

#### 4. Conclusões

Os resultados das simulações indicam uma variação desigual entre o Hemisfério Norte e o Hemisfério Sul nos vários cenários estudados. Em todos os cenários, excepto no cenário de máximo de Maunder, as variações de temperatura tendem a ser maiores no hemisfério Norte do que no Sul.

As diferenças de temperatura global simuladas entre o máximo e mínimo solar é muito pequena, de forma que globalmente a variação solar tem pouca influência no clima da terra, no entanto, a nível local e sazonal existem variações de maior amplitude.

Em todos os cenários estudados, as maiores variações da temperatura à superfície são observadas nas latitudes mais elevadas e durante os meses de Inverno de cada Hemisfério .

### **Bibliografia**

- Camp, C. and K. Tung (2007). Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection, *Geophysical Research Letters*, **34**(14).
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Frohlich, C. and J. Lean. (1998). The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976, *Geophys. Res. Lett.*, **25**(23), 4337-4380.
- Haigh, J. (2003). The effect of solar variability on the Earth's climate, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **361**, 95-111.
- Hansen, J., G. Russell, D. Rind, P. Stone, A. Lacis, S. Lebedeff, R. Ruedy and L. Travis. (1983). Efficient Three-Dimensional Global Models for Climate Studies: Models I and II, *Month. Weather Review*, **11**, 609-662.
- Lean, J. and D. Rind. (1998). Climate forcing by changing solar radiation, *Journal of Climate*, **11**, 3069-3094.
- Rind, D., J. Lean, R. Healy. (1999). Simulated time-dependent climate response to solar radiative forcing since 1600, *Journal of Geophysical Research*, **104**, n° D2, 1973-1990.
- Scafetta, N. and B. West. (2005). Estimate solar contribution to the global surface warming using the ACRIM TSI satellite composite, *Geophys. Res. Lett.*, **32**(22).
- Shindell, D., G. Schmidt, M. Mann, D. Rind, A. Waple. (2001). Solar forcing of regional climate change during Maunder minimum, *Science*, **294**, 2149-2152.
- Wilson, R. and A. Mardinov. (2003). Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1199.