



Mudanças abruptas ('jerks') na variação secular do campo geomagnético e alterações concomitantes no campo geotérmico raso.

Leonardo Jandre Mataruna e Valiya M. Hamza, Observatório Nacional – ON/MCT, Rio de Janeiro

Copyright 2010, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

Abstract

In the present work we report results of an analysis of the secular variation of the geomagnetic field and of the concomitant changes in the climate of the past centuries, in the context of a search for possible correlations between these two phenomena. Our approach to this problem is focussed on examining the temporal and spatial variations of abrupt changes in secular variation, known as jerks. The data bases used in this study include records of magnetic field changes at geomagnetic observatories and results of selected geothermal measurements (this latter one allow extraction of climate signals from temperature logs of boreholes). A reasonably good correlation is found between the evolutionary characteristics of jerks of the period of 1969 to 1991 and the occurrence of recent climate warming episode. Attempts to extend this correlation to occurrence of jerks prior to 1950 have met with only limited success due to limitations of the data base and methodology employed. The processes responsible for global scale correlation between geomagnetic field variations and climate changes include episodic release of trapped fluids in geothermal systems and its effect on large scale ocean circulation systems.

Introdução

O campo geomagnético observado na superfície da Terra é caracterizada por um conjunto de variações periódicas no tempo produzidas por diversos mecanismos externos e internos à Terra. Variações de curto prazo (um ano ou menos) são geralmente causados por correntes elétricas na ionosfera e na magnetosfera, enquanto as variações dos períodos mais longos, conhecidos como variação secular, são oriundas de processos dinâmicos no interior planetário. As variações seculares não são uniformes, ocorrendo mudanças abruptas, em forma de impulsos. Courtillot et al. (1978) estudaram o impulso da década de 1970, conhecido atualmente como o 'jerk' de 1969. Le Mouel et al (1982) estudou um extenso conjunto de registros de observatórios mostrando que este tipo de evento foi observado em todo o mundo. Os eventos de 'jerks' mais recentes possuem registros de observações do campo geomagnético. Foram identificadas ocorrências de 'jerks' por volta dos anos de 1901, 1913, 1925, 1932, 1949, 1958, 1969, 1978, 1986, 1991 e 1999. Quatro desses (1969, 1978, 1991, 1999) possuem inegável

extensão global, três (1901, 1913, 1925) parecem possuir a mesma extensão, os remanescentes (1932, 1949, 1958, 1986) são reconhecidos localmente (Kerridge & Barraclough 1985; Alexandrescu et al. 1996; Macmillan 1996; De Michelis & Tozzi 2005). A figura (1) ilustra localização dos observatórios que registraram as ocorrências dos 'jerks' escolhidos para este estudo.

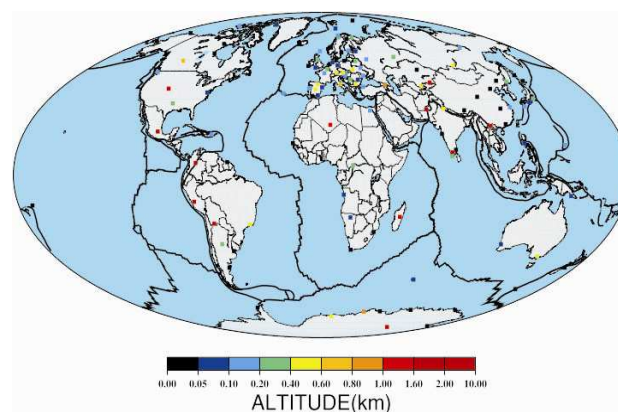


Figura (1) Localização de Observatórios Magnéticos que registraram as ocorrências dos 'jerks' e sua proximidade geográfica com fronteiras de placas tectônicas.

A ocorrência abrupta ('Jerk') configura como uma mudança brusca no padrão da variação secular do campo magnético da Terra. De acordo com os dados disponíveis os 'jerks' ocorrem em escala de tempo de poucos meses a alguns anos. Utiliza-se geralmente a primeira diferença da variação secular para delimitar o intervalo de tempo de atuação do 'jerk'. Deste ponto de vista a variação secular pode ser considerada como composto de um conjunto de segmentos de reta separados por 'jerks' geomagnéticos.

Jerks geomagnéticos também têm sido associados a diferentes fenômenos geofísicos de alcance global. Destacam-se neste contexto os resultados que indicam possíveis correlações com os fenômenos como o movimento tipo 'wobble' de Chandler, alterações no comprimento do dia e mudanças no clima local (Gallet et al, 2005; Courtillot et al, 2007). Apesar dos fortes indícios de correlação entre as ocorrências de jerks e as mudanças climáticas nos países na Europa e na América do Norte não foram efetuados até o momento estudos semelhantes no hemisfério sul. Por outro lado, as disponibilidades de modelos computacionais do campo magnético terrestre e dos resultados de estudos geotérmicos que permitem avaliação das mudanças climáticas abrem a perspectiva de realizar estudos desta

natureza na America do Sul. O presente trabalho visa a avaliação de jerks do campo magnético e mudanças concomitantes no clima local.

Metodologia Utilizada na Identificação dos ‘Jerks’

Sabaka et al (2004) desenvolveram um modelo compreensivo do campo magnético da Terra. A versão deste modelo denominada de CM4 foi utilizada no processamento de dados neste trabalho. A vantagem do modelo CM4 é a sua habilidade em separar a contribuição da fonte interna (originário do núcleo externo terrestre) das contribuições de fontes externas (ionosféricas e magnetosféricas).

No presente trabalho calcularam-se inicialmente valores diários de campos gerados por essas fontes que foram utilizados posteriormente nos cálculos de médias anuais. Como exemplo ilustrativo apresenta-se na Figura (2) as médias anuais da Componente Y registradas no Observatório de Valentine (Irlanda) de 1900 a 2008.

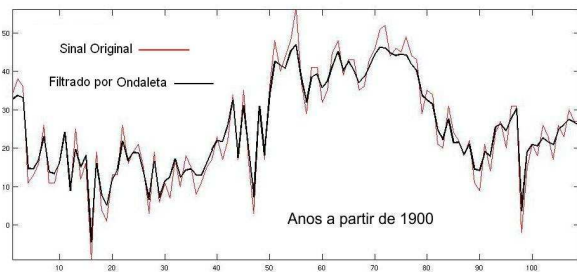


Figura (2) Médias anuais da Componente Y registradas no Observatório de Valentine (Irlanda) de 1900 a 2008. Analisadas e filtradas por algoritmos de ondaletas.

Geralmente grande parte dos episódios de mudanças bruscas são manifestações do campo magnético local. A identificação de impulsos de origem profunda é efetuada com base na identificação das correlações de registros de vários observatórios e na expansão harmônica do campo até o grau 12. Como exemplo ilustrativo apresenta-se na figura (3) as mudanças correlacionadas de variação secular campo da Componente Y calculado pelo CM4 sobre os observatórios de Valentine (Irlanda) e Toledo (Espanha).

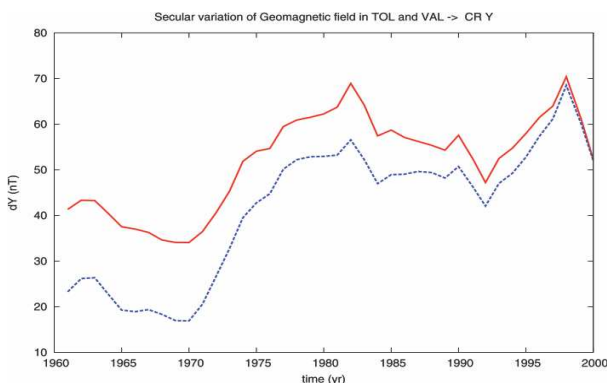


Figura (3) Variação Secular da Componente Y, calculadas pelo modelo CM4, para os dados de observatórios de Valentine (Irlanda) e Toledo (Espanha).

Na etapa seguinte deste trabalho os programas computacionais do modelo CM4 foram utilizados na identificação das variações seculares e escolha dos períodos de ocorrências de jerks geomagnéticos. Como exemplo ilustrativo apresenta-se na figura (4) os ‘jerks’ registrados em quatro observatórios magnéticos, situados na Europa, America Latina e África.

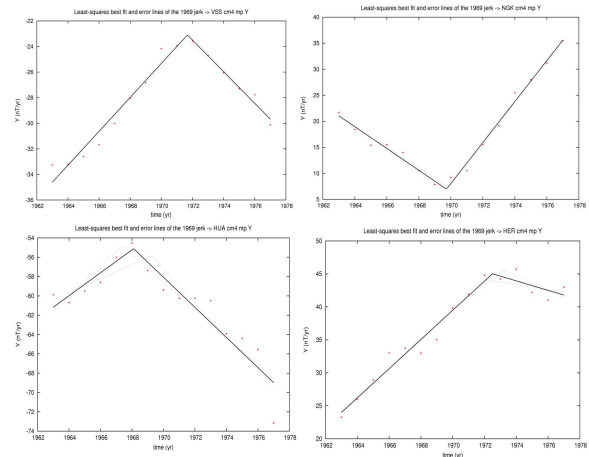


Figura (4) Ajuste de retas características do ‘jerk’ de 1969 na variação secular calculada para quatro observatórios magnéticos, situados na Europa (NGK), America Latina (VSS e HUA) e África (HER).

Resultados Obtidos

Foram utilizados neste trabalho dados registrados e sintéticos de 123 Observatórios Magnéticos, do período de 1960 a 2000. A característica principal dos resultados obtidos é a constatação de que os períodos de ocorrências de ‘jerks’ registrados nos diversos observatórios magnéticos não são simultâneos. A faixa da variação se encontra no intervalo de 10 a 20 anos. Constam na Tabela (1) Períodos médios dos componentes X e Y de jerks ocorridos em 1969, 1978 e 1991 e os desvios mínimos e máximos encontrados nos jerks de 1969, 1978 e 1991.

Tabela (1) Períodos médios dos componentes X e Y de jerks ocorridos em 1969, 1978 e 1991, determinados com base em dados de 123 Observatórios.

Média	Componente	Desvios do Período	
		Mínimo	Máximo
1970.76	X	-4.63	3.75
	Y	-4.76	4.46
1976.67	X	-2.67	6.05
	Y	-4.54	4.24
1991.51	X	-3.51	3.32
	Y	-3.96	4.36

Outro fato marcante dos resultados obtidos se refere às diferenças sistemáticas nos registros de jerks em observatórios dos hemisférios de Norte e Sul. O gráfico polar da Figura (6) ilustra os atrasos diferenciais do jerk de 1969, do componente Y do campo geomagnético. O valor médio do atraso no hemisfério sul é cerca de dois anos.

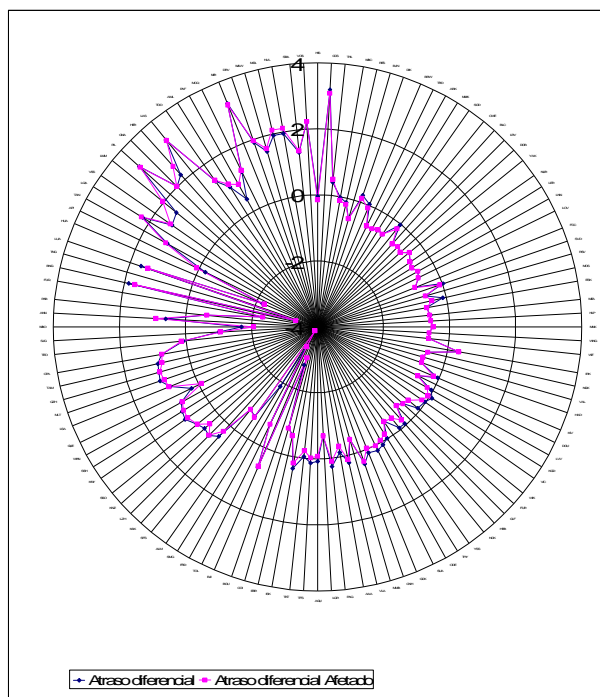


Figura (6) Gráfico polar dos atrasos diferenciais do jerk de 1969, sobre a componente Y do campo geomagnético ordenado pela latitude observatório e atrasos diferenciais afetados por ruído magnetosférico.

Conexão entre 'jerks' e Mudanças Climáticas

O objetivo aqui é apresentar uma síntese dos resultados que apontam para ocorrências de variações climáticas em períodos concomitantes com as ocorrências de 'jerks' do campo magnético. Notamos neste contexto que métodos geotérmicos têm sido utilizados freqüentemente para avaliações das variações nas temperaturas de superfície (e.g. Cermak, 1971; Lachenbruch et al, 1982; Beltrami et al, 1992; Bodri and Cermak, 1995; Duchkov and Sokolova, 1998; Hamza, 1999; Huang et al, 2000; Harris and Chapman, 2001; Majorowicz and Safanda, 2001; Golovanova et al, 2001; Beltrami and Burlon, 2004; Hamza et al, 2005).

Apresentamos inicialmente informações sobre os dados geotérmicos compilados e as metodologias utilizadas no processamento de dados perfis térmicos. Os resultados obtidos se encontram reunidos na parte final deste item.

Princípio do Método Geotérmico: Mudanças climáticas são geralmente acompanhadas de variações na temperatura da superfície. Penetração em profundidade dessas variações, gera perturbações no campo térmico da camada superior da crosta. Os efeitos térmicos das variações climáticas se encontram sobrepostos à variação de temperaturas determinadas pelo gradiente geotérmico local. As perturbações térmicas induzidas por variações climáticas de longo período penetram em profundidades muito superiores às das variações anuais. Obviamente, a característica da perturbação depende da natureza das mudanças climáticas. Por exemplo, um

acréscimo na temperatura média anual da superfície induz uma concavidade (em relação ao eixo de profundidade) na distribuição vertical das temperaturas em profundidades rasas. Por outro lado, um decréscimo na temperatura induz uma convexidade na distribuição vertical das temperaturas. Estes casos são ilustrados na figura esquemática (4).

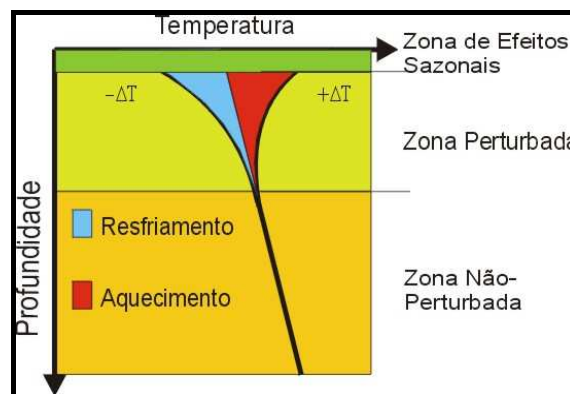


Figura (4) Representação esquemática de perfil térmico na presença de perturbações climáticas.

Análises de Dados Geotérmicos: Métodos diretos e inversos foram empregados nas análises de dados de perfis térmicos. Os princípios do método direto foram avaliados na literatura geotérmica desde a década de 1950 (Birch, 1948; Cermak, 1971; Vasseur et al, 1983; Lachenbruch et al, 1986, 1988). Soluções analíticas se encontram disponíveis para casos em que a variação de temperatura da superfície pode ser representada por leis de potência. Por exemplo, para uma variação linear (tipo rampa) na temperatura da superfície a relação entre a magnitude do sinal climático (ΔT) e o tempo decorrido (t) em qualquer profundidade (z) é (Carslaw and Jaeger, 1959):

$$\Delta T(z) = 4 \Delta T i^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{4\kappa t}}\right) \quad (1)$$

em que $i^2 \operatorname{erfc}$ é a segunda integral da função complementar do erro e κ a difusividade térmica do meio. A função rampa que melhor ajusta aos dados observados é obtido por um processo de inversão iterativa, tais como método de Newton linearizado (Chisholm and Chapman, 1992; Golovanova et al, 2001; Roy et al, 2002). Este procedimento permite determinação simultânea da mudança de temperatura da superfície e seu período de ocorrência. A limitação principal de método de modelagem direta é que este realça apenas as feições de primeira ordem na história climática. É decorrente da suposição de que a parte inferior de perfil térmico, utilizado para determinação de gradiente de temperatura, é livre das perturbações climáticas.

No método de inversão (Tarantola and Valette, 1982) a informação a priori é explicitamente incorporada na obtenção da solução. O método de inversão em espaço funcional (FSI), desenvolvido por Shen e Beck (1991, 1992) e Shen et al (1992), utiliza a teoria não linear de mínimos quadrados na solução de equação de condução de calor. O algoritmo utilizado minimiza a função desajuste:

$$S(m) = \frac{1}{2} \left\{ \left[(d-d_0)^t C_d^{-1} (d-d_0) \right] + \left[(m-m_0)^t C_m^{-1} (m-m_0) \right] \right\} \quad (2)$$

em que d e d_0 são respectivamente as temperaturas calculadas e observadas, m e m_0 os parâmetros calculados e a priori do modelo e C_d e C_m as matrizes de covariância de d_0 e m_0 . C_d indica a incerteza nos dados de perfil térmico enquanto C_m indica a incerteza no modelo a priori. A seleção de valores apropriados para os desvios padrão a priori de temperaturas (σ_{d0}) e a condutividade térmica (σ_{k0}) dos dados são importantes nas determinações das soluções.

Sinais Climáticos Extraídos de Perfis Geotérmicos: Dados de perfis geotérmicos obtidos em 54 localidades foram avaliados para determinação de variações climáticas no território nacional. A distribuição geográfica de dados geotérmicos é ilustrada na Figura (5).

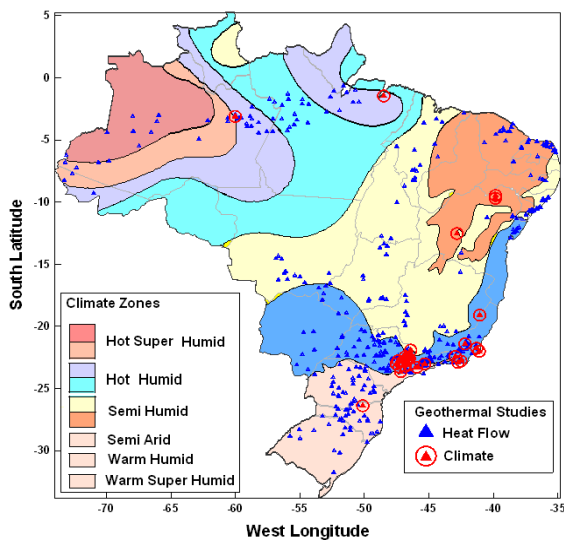


Figura (5) Distribuição de dados geotérmicos utilizados nos estudos de variação climática.

Resultados Obtidos: As variações de temperaturas da superfície determinadas pelo método de inversão são ilustradas na Figura (6) para oito localidades no Brasil.

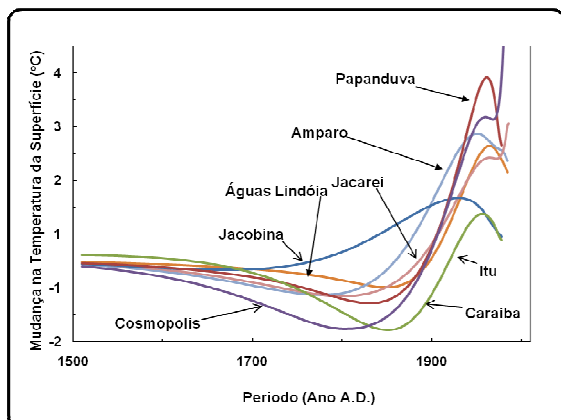


Figura (6) variações nas temperaturas da superfície em oito localidades nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil.

De acordo com os resultados obtidos as variações de temperaturas na superfície são praticamente desprezíveis no período de 1500 a 1700 A.D. No período de 1700 a 1900 ocorreu um episódio de leve esfriamento. Contudo, a característica marcante da variação climática nesta figura é aumento significativo de temperaturas da superfície no período de 1900 a 2000. Na maioria dos locais as variações têm alcançados valores máximos no período de 1960 a 1990.

Concomitância entre os ‘Jerks’ e Mudança Climática

Análise comparativa das características das mudanças na variação secular do campo magnético e das alterações climáticas aponta para uma possível conexão entre esses dois fenômenos. Nota-se que um máximo na taxa de variação do campo magnético ocorreu no período de 1969 à 1990 (ver Tabela 1), enquanto o máximo de variação climática ocorreu na mesma década (ver Figura 6). A fim de ilustrar esta conexão apresentamos na Figura (7) variação do indicador de desajuste entre a variação secular e o modelo de jerk, para os dados do Observatório Magnético de Vassouras (RJ). Nesta figura é fácil notar que o mínimo de desajuste ocorreu no período entre os anos 1968 e 1974. Este é o mesmo período de maiores valores nas temperaturas da superfície, conforme ilustrado na Figura (6) para duas localidades.

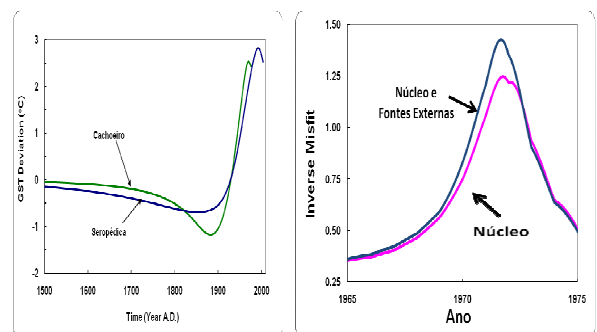


Figura (7) variação do indicador de ajuste entre a variação secular e o modelo de jerk, para os dados do Observatório Magnético de Vassouras.

Discussão e Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que as ocorrências abruptas (‘Jerks’) na variação secular geomagnético são concomitantes com as mudanças climáticas dos últimos séculos no Brasil. No presente trabalho, a identificação dessa correlação é restrito à ocorrência de ‘jerk’ da década de 1970. A baixa resolução da história climática, decifrada a partir de métodos geotérmicos, e a ausência de um numero maior de observatórios magnéticos são identificados como limitações principais.

De acordo com os dados de literatura ocorreram cerca de 15 jerks magnéticos nos últimos 200 anos. No entanto, as mudanças climáticas inferidas com base nos métodos geotérmicos indicam apenas cinco episódios. Constam na Tabela (2) a relação comparativa de jerks magnéticos e mudanças climáticas.

Tabela (2) Comparação dos períodos médios dos jerks e mudanças climáticas.

Intervalo de ocorrência		Observação
Jerk Magnético	Mudança Climática	
1990 - 1991		Ainda sem registro
1976 - 1980	1960 -1980	Aquecimento Global
1965 - 1972	1960 -1980	Aquecimento Global
1958	1950 – 1960	Inflexão da curva de Temperaturas de Superfície
1901 - 1949	1800 - 1950	Esfriamento Global

Courtillot et al (1984), Backus (1983) e Backus (1991) argumentam sobre possível contaminação externa por efeito remanescente do ciclo solar. A metodologia deste trabalho foi aplicada ao conjunto de médias anuais do número de manchas solares observados nos mesmos intervalos de tempo característicos dos Jerks de 1969, 1978 e 1991. Os resultados obtidos, dois deles apresentados na Figura (8), apontam correlações significativas com as ocorrências de jerks.

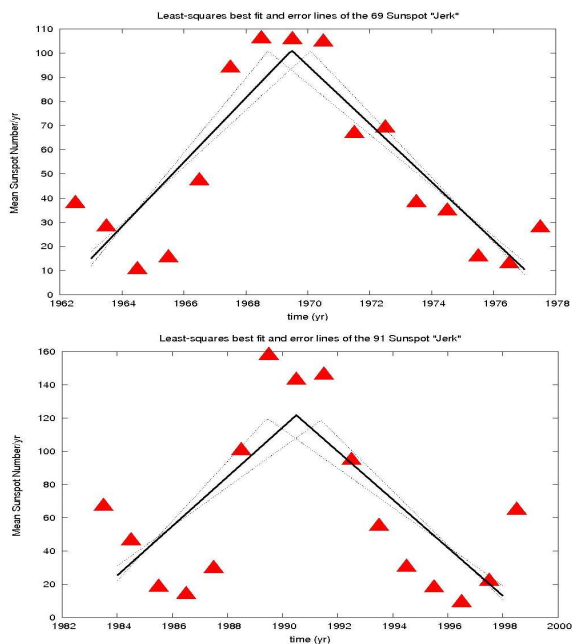


Figura (8) Ajuste de mínimos quadrados para retas características dos 'jerks' aplicados à média anual do

número de manchas solares observada durante os períodos de ocorrência dos jerks de 1969, 1978 e 1991.

As correlações observadas na Figura (8) reforçam a hipótese apresentada neste trabalho de que os mecanismos causadores de jerks magnéticos são relacionados com as mudanças climáticas.

Atualmente não há consenso pleno sobre os mecanismos causadores de jerks. Contudo, é possível que a liberação episódica de fluidos geotérmicos das cadeias oceânicas poderá induzir mudanças no sistema de circulação marinha, o que por sua vez influenciaria as variações no campo magnético.

Agradecimentos

O primeiro autor deste trabalho é recipiente de bolsa de Mestrado concedido pela Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Ensino Superior – CAPES. Agradecemos Dra. Katia J. Pinheiro pelas sugestões na fase inicial deste projeto e Dr. Iris Pereira Escobar pelo apoio institucional.

Referências

- Allredge, L.R. 1982, Geomagnetic models and the solar cyclic effect. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 965-970.
- Allredge, L.R. 1984, A discussion of Impulses and Jerks in the Geomagnetic Fields. *Journal of Geophysical Research*, 89, 4403 – 4412.
- Alexandrescu M, Gibert D, Hulot G, Le Mouel J-L and Saracco G. 1996, Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks. *J. Geophys. Res.*, 101(B10): 21975-21994.
- Bard and Frank, 2006 E. Bard and M. Frank, Climate change and Solar variability: What's new under the sun?, *Earth Planet. Sci. Lett.* 248 (1–2) (2006), pp. 1–14.
- Beltrami, H., and J. C. Mareschal, Ground temperature histories for central and eastern Canada from geothermal measurements: Little Ice Age signature, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 689–692, 1992.
- Beltrami, H. and Bournon, E.: Ground warming patterns in the Northern Hemisphere during the past five centuries, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 227, 169–177, 2004. Birch, 1948;
- Bodri, L. and Cermak, V.: Climate changes of the last millennium inferred from borehole temperatures: results from the Czech Republic – Part I, *Global and Planetary Change*, 11, 111–125, 1995
- Cermak, V.: Underground temperature and inferred climatic temperature of the past millennium, *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 10, 1–19, 1971.
- Chisholm, T. J. and Chapman, D. S.: Climate change inferred from analysis of borehole temperatures: an

example from western Utah, *J. Geophys. Res.*, 97, 14 155–14 175, 1992

of Physics, 11 (6): 063015 DOI: 10.1088/1367-2630/11/6/063015.

Courtilot, V., Ducruix, J., & Le Mouél, J.-L. 1978, *C.R. Acad. Sci. Paris Ser. D*, 287, 1095

Courtilot, V., Gallet, Y., Le Mouél, J.-L., Fluteau, F., Genevey, A., 2007. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? *Earth Planet Sci. Lett.* 253, 328–339.

De Michelis, P., & Tozzi, R. 2005, *EPSL*, 235, 261

Duchkov, A. D., and L. S. Sokolova, Investigation of temperature changes at the Earth's surface via borehole geothermometry, in *Problems of climatic reconstruction and environment of the Holocene and the Pleistocene in Siberia* (in Russian), pp. 151– 157, vol. 1, Nauka, Novosibirsk, Russia, 1998.

Gallet, Y., Genevey, A., and Fluteau, F., 2005, Does Earth's magnetic field secular variation control centennial climate change?, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 339-347.

Golovanova I V, Harris R N, Selezniova G V and Stulc P 2001 Evidence of climatic warming in the southern Urals region derived from borehole temperatures and meteorological data *Glob. Planet. Change* 29 167–88.

Hamza, V. M., 1991, Recent climate changes in the southern hemisphere: the geothermal evidence (In Portuguese), *Proceedings 2nd Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador (BA)*, 971-973.

Hamza, V. M., Cavalcanti, A.S.B. and Benyosef, L.C., 2007, Surface thermal perturbations of the recent past at low latitudes –inferences based on borehole temperature data from Eastern Brazil., *Clim. Past*, 3, 513–526.

Huang, R. X., M. A. Cane, N. Naik, and P. Goodman (2000), Global adjustment of the thermocline in response to deepwater formation, *Geophys. Res. Lett.*, 27(6), 759–762, doi:10.1029/1999GL002365.

Harris and Chapman, 2001

Kerridge, D.J. and D.R. Barraclough (1985): Evidence for geomagnetic jerks from 1931 to 1971, *Phys. Earth. Planet. Inter.*, 39, 228-236

Le Mouél, J.-L., Ducruix, J., & Duyen, C.H. 1982, *PEPI*, 28, 337

Nagao, H., T. Iyemori, T. Higuchi, S. Nakano, and T. Araki, Local time features of geomagnetic jerks, *Earth Planets Space*, 54, 119–131, 2002

Pinheiro, K.J. e Travassos, J.M., 2010, Impulses of the geomagnetic secular variation (jerks) at Vassouras magnetic observatory detected by wavelet analysis. *Rev. Bras. Geof.*, v. 28, n. 1, p. 37-46.

Ryskin, G., 2009, Secular variation of the Earth's magnetic field: induced by the ocean flow? *New Journal*