

# ITERATIVE REGRESSION ANALYSIS OF PERIODICITIES IN GEOPHYSICAL RECORD TIME SERIES

N. R. Rigozo<sup>1</sup> & D. J. R. Nordemann<sup>2</sup>

The aim of this work was to use an Iterative Regression Analysis Method for the determination of periodicities in geophysical time series. This method gives, for every identified sine function, its three parameters and their standard deviation due to measurement errors and to the presence of adjustment residues. This feature allows to select the most important periodicities with higher amplitude/deviation ratio. The method described was applied to the analysis of the main periodicities in time series of atmospheric cosmonuclides (atmospheric carbon 14 and beryllium 10 of ice cores from Greenland and Antarctica), mean surface temperatures and indicators of atmospheric volcanic dust. During the time interval of these series, the periodicities found were compared from the point of view of possible causal associations between such phenomena as solar activity, cosmonuclide concentrations in the terrestrial atmosphere, atmospheric circulation, temperatures of the air and volcanic dust in the atmosphere.

**Key words:** Geophysical records; Periodicities; Iterative regression; Solar activity; Cosmonuclides; <sup>14</sup>C; <sup>10</sup>Be.

**ANÁLISE POR REGRESSÃO ITERATIVA DE PERIODICIDADES EM SÉRIES TEMPORAIS DE REGISTROS GEOFÍSICOS** - *O objetivo deste trabalho foi a utilização do método da regressão iterativa para a determinação das periodicidades de fenômenos geofísicos. Este método fornece os três parâmetros (amplitude, frequência e fase) e seus desvios padrões para cada função senoidal das periodicidades determinadas. Isto permite uma seleção das amplitudes mais importantes, que apresentarem maior relação amplitude/desvio. O método descrito foi aplicado à análise das séries temporais dos cosmonuclídeos atmosféricos (carbono 14 atmosférico e berílio 10 acumulado em testemunhos de gelo na Groenlândia e Antártica), temperaturas médias de superfície e indicadores de presença de poeira vulcânica. As periodicidades achadas foram comparadas, do ponto de vista de possíveis ligações causais, entre os fenômenos envolvidos (atividade solar, presença de cosmonuclídeos na atmosfera terrestre, circulação atmosférica, temperaturas da atmosfera e aerossóis vulcânicos na atmosfera).*

**Palavras-chave:** Registros geofísicos; Periodicidades; Regressão iterativa; Atividade solar; Cosmonuclídeos; <sup>14</sup>C; <sup>10</sup>Be.

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515, CEP: 12201-970, São José dos Campos, SP, Brasil.  
Fone: (012) 345-6786 Fax: (012) 345-6810 E-Mail: rodolfo@dge.inpe.br

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515, CEP: 12201-970, São José dos Campos, SP, Brasil.  
Fone: (012) 345-6840 Fax: (012) 345-6810 E-Mail: nordeman@dge.inpe.br

## INTRODUÇÃO

Um corpo no espaço fica exposto à ação direta dos raios cósmicos. Estes, por sua vez, provocam diversos tipos de reações nucleares. Essa exposição à radiação cósmica, resulta na formação dos radionuclídeos cosmogênicos. Os raios cósmicos, que geram os radionuclídeos cosmogênicos, são divididos em duas componentes: 1- Raios Cósmicos Galáticos (RCG), cuja origem se encontra fora do sistema solar, e que possuem altíssimas energias, com um máximo de abundância entre  $10^3$  e  $10^4$  MeV aproximadamente. 2- Raios Cósmicos Solares (RCS), cuja origem se dá no próprio Sol e cujas energias (tipicamente inferiores a  $10^3$  MeV) são bem menores que as dos RCG.

Dois dos radionuclídeos cosmogênicos mais conhecidos são o carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ) e o berílio-10 ( $^{10}\text{Be}$ ). O cosmonuclídeo atmosférico carbono-14 (emissor  $\beta^-$  com  $E_{\text{máx}} = 155$  keV, cuja meia-vida é de 5730 anos) é produzido pelos neutrons secundários, dos RCG, pela reação  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ . O berílio-10 (emissor  $\beta^-$  com  $E_{\text{máx}} = 550$  keV, cuja meia-vida é  $1,5 \times 10^6$  anos) (Damon & Lerman, 1978), é produzido por reações de espalhamento nuclear dos prótons e nêutrons (primários e secundários dos RCG) sobre o oxigênio e o nitrogênio da atmosfera.

O  $^{14}\text{C}$ , após oxidar-se em  $^{14}\text{CO}_2$ , mistura-se com o  $\text{CO}_2$  atmosférico. Ele é, então, assimilado pelas plantas através da fotossíntese. Através deste processo a razão de produção do  $^{14}\text{C}$ , no topo da atmosfera, é registrada em anéis de árvores. Estes registros são usados como indicadores da razão de produção do  $^{14}\text{C}$  no passado - a partir de um modelo do reservatório de carbono, que descreve a troca do carbono entre a atmosfera, os oceanos e a biosfera.

O depósito de  $^{10}\text{Be}$  na superfície da Terra, ocorre principalmente por precipitação. Ele é transportado pelas chuvas e pela neve, nas montanhas e regiões polares. Nestas regiões, o gelo acumulado (na superfície) representa um sistema fechado - devido às interferências, com o meio ambiente, serem mínimas. Com isso o gelo representa um bom "arquivo de informações" sobre o passado, pois contém registros contínuos e uma boa resolução de tempo.

Usando o método da regressão iterativa, através de um programa de computador, serão estudadas as possíveis relações entre os fenômenos geofísicos envolvidos. Mediante uma comparação dos resultados obtidos das periodicidades, em séries temporais, representativas destes fenô-

menos. As séries analisadas foram: os nuclídeos cosmogênicos ( $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$ ), o número anual de manchas solares, o índice do véu de poeira vulcânica e a temperatura média global do ar na superfície da Terra.

## PROCURA DE PERIODICIDADES EM SÉRIES TEMPORAIS

O método da regressão iterativa, descrito na sua forma geral por Wolberg (1967), Nordemann (1992) e Rigozo (1994), será aplicado na procura de periodicidades, em séries temporais. Este método pode ser aplicado ao ajuste de qualquer função (derivável em relação aos parâmetros e variáveis) a dados experimentais, sem necessidade de linearização prévia. Ele é aplicado, neste trabalho, à procura de periodicidades em séries temporais, com o uso, para cada período considerado, de uma única função senoidal com três parâmetros desconhecidos,  $a_0$  = amplitude,  $a_1$  = frequência angular, e  $a_2$  = fase da função. O ponto inicial do método é a definição da chamada função condicional, que é:

$$F = Y - a_0 \sin(a_1 t + a_2), \quad (1)$$

onde  $Y$  é o sinal medido,  $t$  é o tempo e  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  são os três parâmetros desconhecidos, que serão procurados. Observa-se que a função condicional  $F$  representa, para cada ponto experimental, a diferença entre o valor  $Y$  medido e o da curva de ajuste para a abscissa correspondente.

Como o método é iterativo, à cada iteração são calculados os termos corretivos  $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$ . Eles serão aplicados aos parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ , respectivamente. Os termos corretivos representam as soluções do sistema linear, expresso pela equação:

$$A = C^{-1}V, \quad (2)$$

onde os termos  $C_{ij}$  e  $V_j$ , das matrizes  $C$  e  $V$ , são os somatórios para todos os pontos experimentais dos valores atuais (para cada iteração) das expressões dos termos da direita:

$$C_{ij} = \frac{\left(\frac{dF}{da_i}\right)\left(\frac{dF}{da_j}\right)}{L}, \quad (3)$$

$$V_i = \frac{\left(\frac{dF}{da_i}\right) F}{L}, \quad (4)$$

(para simplificar, conforme o uso, os símbolos de somatório são omitidos)

com

$$L = D_y^2 + \left(\frac{dF}{dt}\right)^2 D_t^2. \quad (5)$$

$L$  é o coeficiente de ponderação, para cada ponto experimental.  $D_y$  e  $D_t$  representam o desvio padrão ou erro, associados aos  $Y$  e  $t$ , respectivamente.

Os termos corretivos  $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$  são aplicados aos parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ , da seguinte forma:

$$a_0 = a_{0_0} - A_0; \quad (6)$$

$$a_1 = a_{1_0} - A_1; \quad (7)$$

$$a_2 = a_{2_0} - A_2; \quad (8)$$

onde  $a_{0_0}$ ,  $a_{1_0}$ ,  $a_{2_0}$  representam os valores iniciais, para a primeira interação. Esses valores podem ser escolhidos arbitrariamente. Porém, para diminuir o tempo de cálculo, escolhe-se valores iniciais da mesma ordem de grandeza que os valores esperados.

A obtenção dos parâmetros desconhecidos  $a_i$  deve respeitar um critério de convergência. As iterações são realizadas até que o somatório dos quadrados dos valores de  $A_i$  fiquem abaixo de um dado valor. Assim, quando obtido esse critério de convergência, os valores dos parâmetros  $a_i$  são considerados como as melhores estimativas. Seus desvios padrões,  $D_{a_i}$  são expressos por:

$$D_{a_i} = \frac{\sqrt{C_{kk}^{-1} S}}{\sqrt{n-p}}, \quad (9)$$

onde  $C_{kk}$  é o termo diagonal da matriz  $C^{-1}$ ,  $n$  é o número de dados experimentais,  $p$  é o número de parâmetros desconhecidos e  $S$  é definido como o somatório, para todos os pontos experimentais, dos quadrados dos resíduos  $F$  definidos na Equação (1) e ponderados pelos coeficientes  $L$ :

$$S = \frac{F^2}{L} \quad (10)$$

O programa realiza, sucessivamente, a procura dos valores dos parâmetros da função senoidal, através de uma varredura dos valores de frequência angular. A variação de frequência angular é de:

$$dw = \frac{2\pi}{t_{max}}, \quad (11)$$

onde  $t_{max} = t_{final} - t_{inicial}$ .

A frequência angular máxima é:

$$w_{max} = dw \frac{N}{2}, \quad (12)$$

onde  $N$  é o número de dados.

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

$$w_n = \frac{\pi}{\Delta t} \text{ ou } f_n = \frac{1}{2\Delta t} \quad (13)$$

onde  $\Delta t$  é o intervalo de amostragem.

## RELAÇÃO ENTRE SOL - CLIMA - CO<sub>2</sub> - <sup>14</sup>C - <sup>10</sup>BE - VULCÕES

As mudanças do clima terrestre podem ser provocadas, entre outros fatores, por variações no balanço de energia solar causadas na Terra por fenômenos naturais como erupções vulcânicas, artificiais como a queima de combustíveis fósseis ou renováveis pelo homem, ou podem ter sua origem na variação da atividade solar que incide energia solar na Terra (Broecker, 1993).

A Fig. 1 mostra um esquema do Sol e de sua emissão de energia que chega na Terra, juntamente com fenômenos naturais e artificiais que podem causar a variação da energia solar incidente.

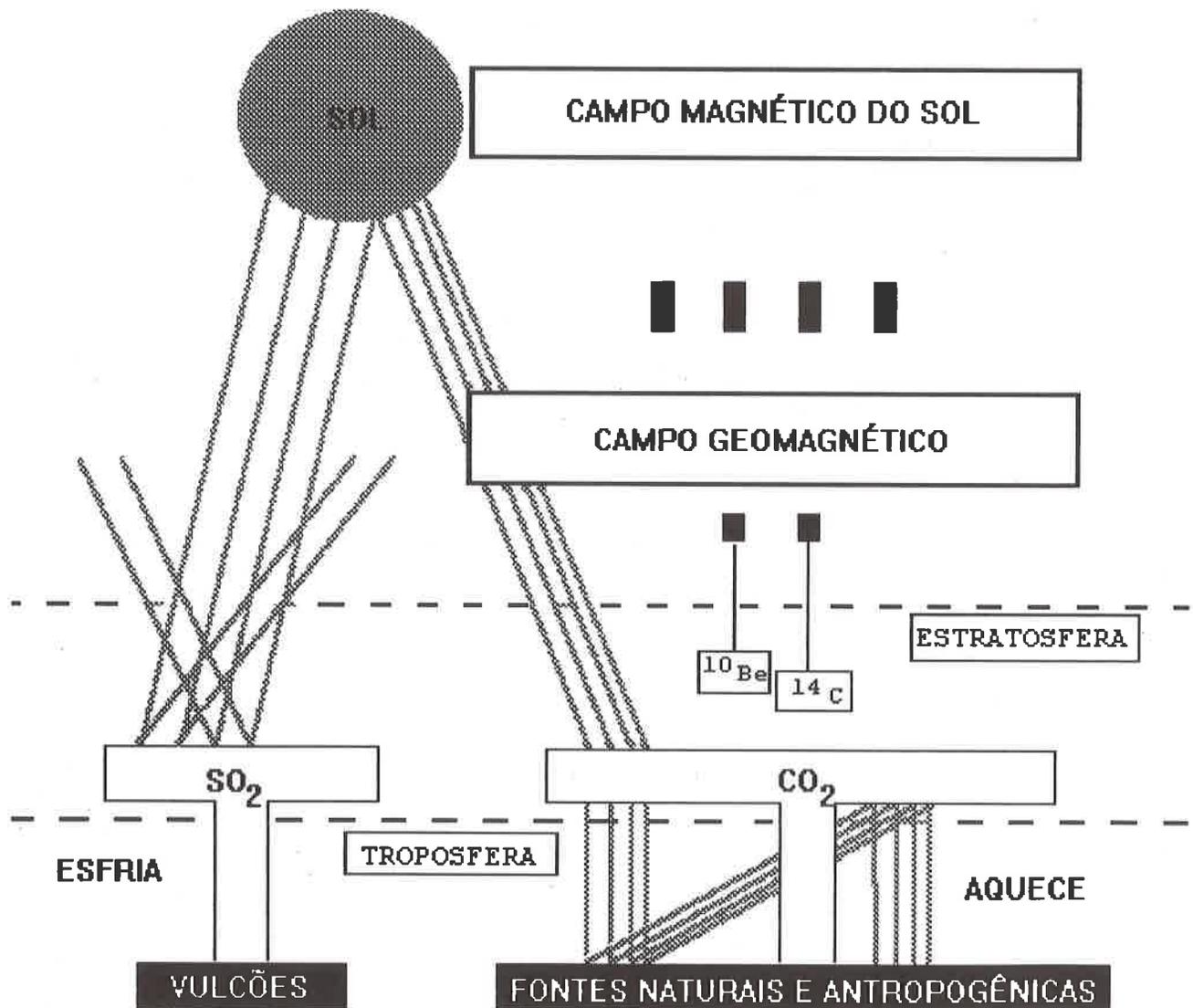
Quando há grandes erupções vulcânicas, ocorre a emissão do dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) na estratosfera, que rapidamente (dentro de um mês ou dois) se transforma em gotas de ácido sulfúrico. Esse ácido espalha eficientemente a luz solar, reduzindo, assim, a radiação que chega à

superfície da Terra, o que provoca um esfriamento do planeta (National Research Council, 1982; LaMarche & Hirschboeck, 1984).

Quando o  $\text{CO}_2$  aumenta na atmosfera - por causas naturais ou antropogênicas (como a queima de combustível fóssil) - ocorre um aquecimento do planeta (Bolin et al., 1979). Este aquecimento é atribuído ao chamado efeito estufa. Ele envolve a luz solar que chega na Terra, atravessa a atmosfera e alcança a superfície do planeta. Por sua vez,

a superfície absorve parte dessa energia, e reemite outra parte em um comprimento de onda muito maior do que a energia incidente. Assim, essa energia reemitida pela superfície encontra a atmosfera mais densa - para os comprimentos de onda maiores - ocasionada pela maior concentração de  $\text{CO}_2$ , não conseguindo atravessá-la. Então, a atmosfera reemite a radiação de volta para a superfície, fazendo com que essa energia fique presa entre a superfície e a atmosfera provocando o aquecimento do planeta.

## RAIOS CÓSMICOS GALÁTICOS



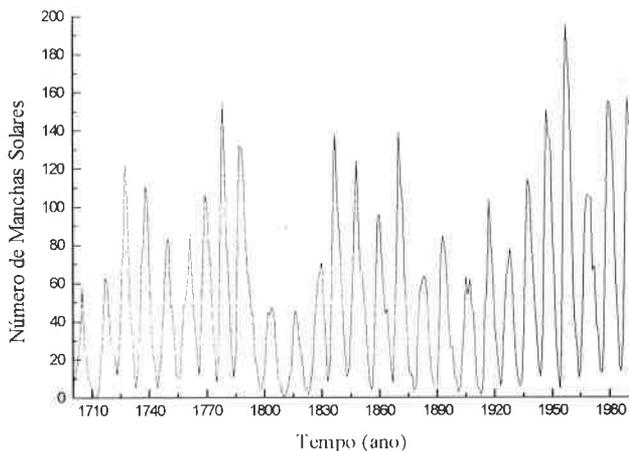
**Figura 1** - Desenho esquemático das possíveis relações Sol - Clima -  $\text{CO}_2$  -  $^{14}\text{C}$  -  $^{10}\text{Be}$  - Vulcões (Rigozo, 1994).

**Figure 1** - Scheme of possible Sun - climate relations -  $\text{CO}_2$  -  $^{14}\text{C}$  -  $^{10}\text{Be}$  - volcanoes (from Rigozo, 1994).

A Fig. 1 ilustra como os raios cósmicos galácticos são modulados. Primeiramente pelo campo heliomagnético, que diminui o fluxo incidente e sua energia (Raisbeck & Yiou, 1984). Depois, pelo campo geomagnético - que torna mais fácil a penetração, em direção da Terra, nas regiões polares e dificulta a penetração nas regiões próximas ao equador. Passando pelo campo geomagnético os raios cósmicos encontram o topo da atmosfera terrestre. Eles interagem, formando os radionuclídeos cosmogênicos  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$  na estratosfera, principalmente, e na troposfera (McHargue & Damon, 1991). O  $^{14}\text{C}$ , logo que formado, se oxida rapidamente, na forma de  $^{14}\text{CO}_2$ , e apresenta um tempo de residência na atmosfera, relativamente, longo (da ordem de anos). O aumento da concentração do  $\text{CO}_2$  na estratosfera e na troposfera provoca a diluição, ou diminuição relativa, do  $^{14}\text{CO}_2$  atmosférico (efeito Suess). No caso do  $^{10}\text{Be}$ , ele se aglutina facilmente aos aerossóis, suspensos na estratosfera permanecendo ali por um ou dois anos, e duas ou três semanas na troposfera. Logo após, se precipita para a superfície da Terra e dos oceanos (Beer et al., 1985).

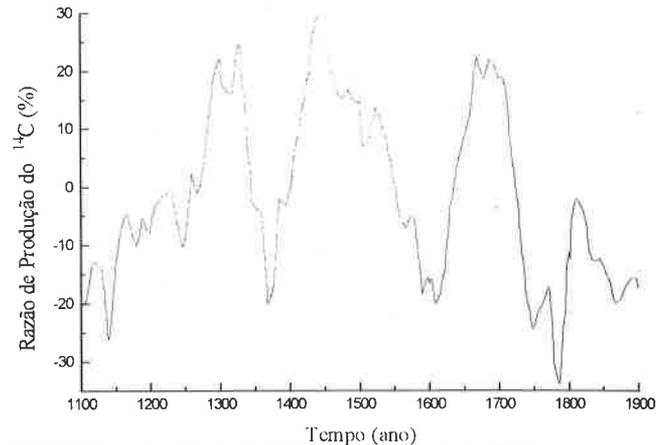
## DADOS UTILIZADOS

As séries temporais utilizadas para os estudos de periodicidades são: o número de manchas solares (Fig.2); a razão de produção do  $^{14}\text{C}$  (Fig.3); as concentrações de  $^{10}\text{Be}$  em testemunhos de gelo em Milcent na Groenlândia (Fig.4) e na Antártica (Fig.5); o índice do véu de poeira vulcânica (Fig.6) que caracteriza a diminuição de transparência ótica da atmosfera devida à presença de aerossóis de origem vulcânica; e as variações da temperatura (média anual) global do ar próximo a superfície da Terra (Fig.7).



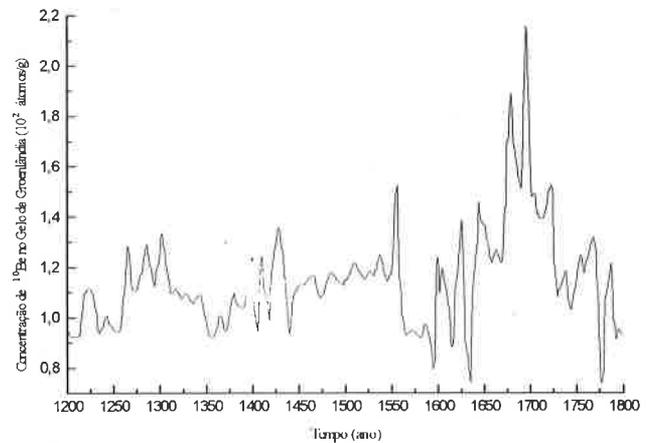
**Figura 2** - Número de Manchas Solares. Fonte: Marple (1987).

*Figure 2 - Sunspot number (from Marple, 1987).*



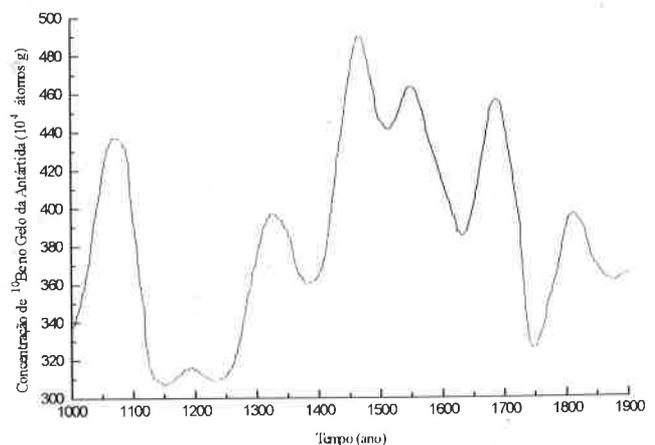
**Figura 3** - Razão de Produção do  $^{14}\text{C}$  (%). Fonte: Stuiver & Quay (1980).

*Figure 3 -  $^{14}\text{C}$  production rate (%) (from Stuiver & Quay, 1980).*



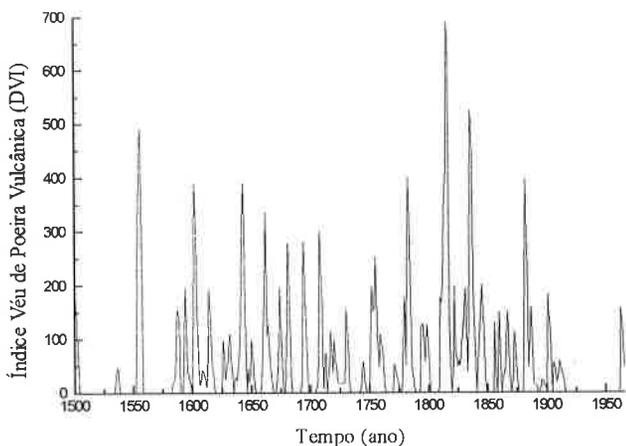
**Figura 4** - Concentração de  $^{10}\text{Be}$  no gelo da Groenlândia ( $10^2$  átomos/g). Fonte: Beer et al. (1985)

*Figure 4 - Greenland ice  $^{10}\text{Be}$  concentration ( $10^2$  atoms/g) (from Beer et al., 1985).*



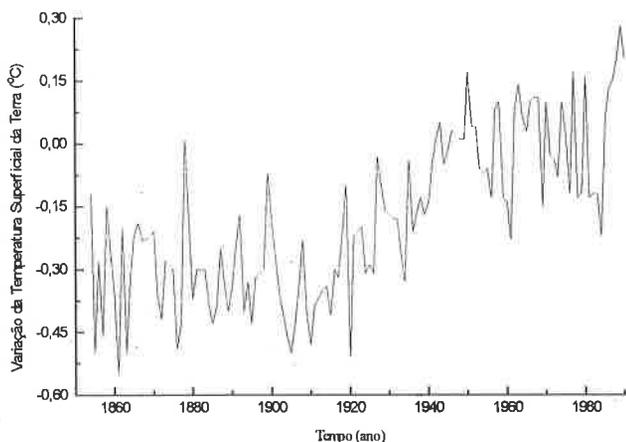
**Figura 5** - Concentração de  $^{10}\text{Be}$  no gelo da Antártida ( $10^4$  átomos/g). Fonte: McHargue & Damon (1991).

*Figure 5 - Antarctica ice  $^{10}\text{Be}$  concentration ( $10^4$  atoms/g) (from McHargue & Damon, 1991).*



**Figura 6** - Índice do Véu de Poeira Vulcânica (DVI). Fonte: LaMarche & Hirschboeck (1984).

**Figure 6** - Volcanic Dust Veil Index (DVI) (from LaMarche & Hirschboeck, 1984).



**Figura 7** - Variações da Temperatura do ar próximo a superfície da Terra (°C). Fonte: Climatic Research Unit (1993).

**Figure 7** - Temperature variations of the air near the Earth surface (°C) (from: Climatic Research Unit, 1993).

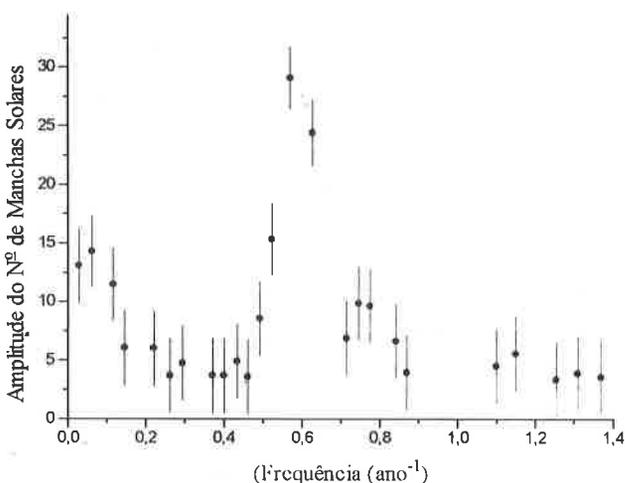
**ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS**

A análise dos dados é iniciada com a eliminação de uma função linear em cada série. Esta função linear representa uma tendência de longo período. Sua eliminação possibilitará uma melhor observação dos baixos e médios períodos contidos nas séries temporais.

O segundo procedimento será a escolha do número de iteração para as análises das séries temporais. Rigozo (1994) utilizou um valor máximo de 200 iterações em suas análises. Ele

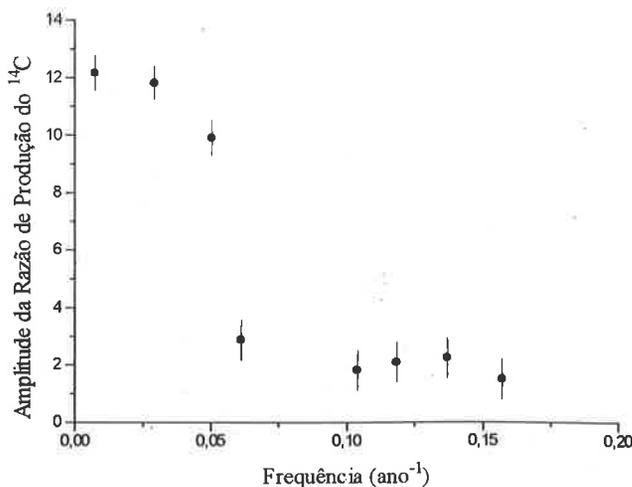
também constatou, em suas análises, que pode-se usar um número bem menor. Um número máximo de 70 iterações já é considerado bom, visto que a perda de convergência, ou seja determinação de alguns períodos, é mínima. Também existe o fator do tempo de cálculo, que depende do número de dados, número de iterações e principalmente do computador utilizado, para efetuar as análises. Assim, esse número baixo de iterações permite uma maior rapidez na determinação das periodicidades.

O último procedimento será a escolha das periodicidades significativas. O método de regressão iterativa gera o desvio padrão ou erro para cada dado calculado. Assim, rejeitamos os dados de periodicidades que apresentarem uma relação amplitude/desvio menor ou igual a um ( $\leq 1$ ).



**Figura 8** - Espectro do Número de Manchas Solares.

**Figure 8** - Sunspot number spectrum.



**Figura 9** - Espectro da Razão de Produção do <sup>14</sup>C.

**Figure 9** - <sup>14</sup>C production rate spectrum.

As Figs. 8, 9, 10, 11, 12 e 13 apresentam os espectros das séries temporais, determinados pelo método da regressão iterativa através das análises das Figs. 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente.

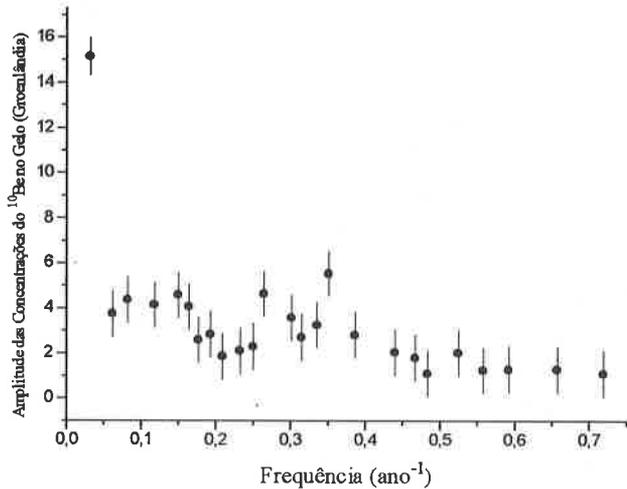


Figura 10 - Espectro das Concentrações do  $^{10}\text{Be}$  no gelo da Groenlândia.

Figure 10 - Greenland ice  $^{10}\text{Be}$  concentration spectrum.

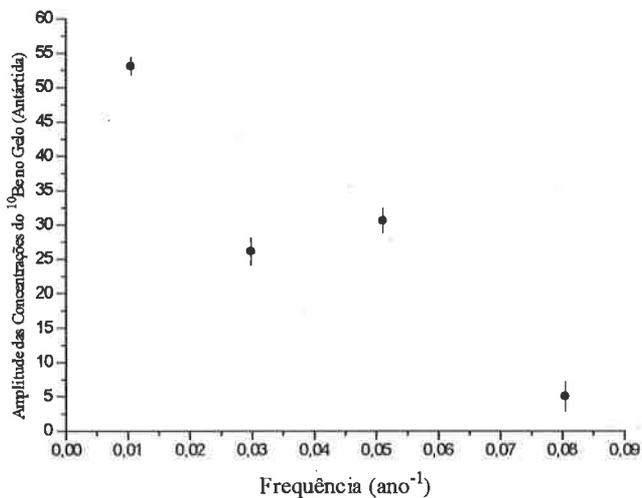


Figura 11 - Espectro das Concentrações do  $^{10}\text{Be}$  no gelo da Antártida.

Figure 11 - Antarctica ice  $^{10}\text{Be}$  concentration spectrum.

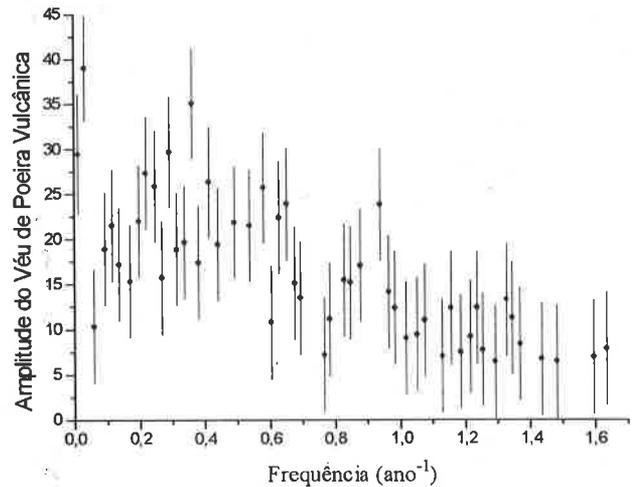


Figura 12 - Espectro do Índice do Véu de Poeira Vulcânica.

Figure 12 - Volcanic Dust Veil Index spectrum.

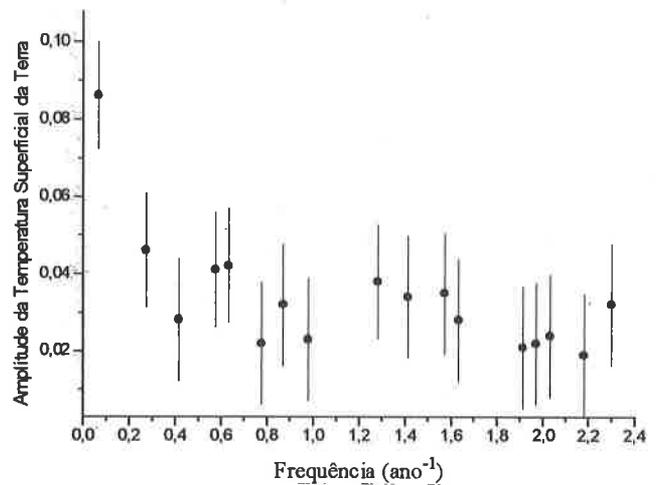


Figura 13 - Espectro das Variações de temperatura Superficial da Terra.

Figure 13 - Earth surface air temperature variation spectrum.

## DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

As periodicidades mais interessantes encontradas nos espectros dos cosmonúclídeos  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$  na Antártida são:  $215 \pm 2$  e  $125 \pm 1$  anos, e  $211 \pm 2$  e  $123 \pm 1$  anos, respectivamente. No  $^{10}\text{Be}$  da Groenlândia observa-se o período de  $102 \pm 3$  anos. Estes períodos correspondem a um aumento periódico na razão de produção do  $^{14}\text{C}$  e das concentrações

do  $^{10}\text{Be}$  no gelo. Isso corresponde aos fenômenos chamados de Mínimo de Wolf, Spörer e Maunder (Stuiver & Quay 1980). Estes fenômenos representam as épocas em que a atividade solar era mínima, possibilitando assim uma maior penetração dos raios cósmicos galácticos no sistema solar e na Terra e, conseqüentemente, uma maior produção dos cosmonuclídeos na atmosfera terrestre.

No  $^{10}\text{Be}$  da Groenlândia, observa-se, ainda, três períodos interessantes,  $27,0 \pm 0,4$ ,  $18,7 \pm 0,3$  e  $12,0 \pm 0,1$  anos. Cada um desses períodos, pode ter uma ligação com fenômenos geofísicos. O período de 27 anos pode estar sendo influenciado pelo ciclo das marés solar e lunar. O período de 18,7 anos corresponde ao ciclo da maré lunar. Já o período de 12 anos pode ser influência do ciclo solar dos 11 anos (Beer et al. 1985).

No espectro do número de manchas solares, o período mais significativo é o de 11 anos que representa o conhecido ciclo solar de 11 anos. Neste período observam-se épocas com um grande número de manchas solares, que representa a atividade solar máxima.

No espectro do índice do véu de poeira vulcânica (IVPV), os períodos mais significativos são:  $198 \pm 8$ ;  $28,7 \pm 0,2$ ;  $21,7 \pm 0,1$ ;  $17,4 \pm 0,1$  e  $11 \pm 0,1$  anos. Os cosmonuclídeos  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$  apresentam um período na faixa de 200 anos que pode ser relacionado com o período de 198 anos observado no IVPV. O período de 29 anos é muito próximo ao período do ciclo das marés solar e lunar. O período de 17,4 anos, também, é muito próximo ao ciclo lunar. Já os períodos de 22 e 11 anos podem apresentar uma possível relação com o ciclo solar.

No espectro das variações de temperatura do ar próxima a superfície; os períodos mais interessantes são:  $23,1 \pm 0,7$  e  $10,0 \pm 0,2$  anos. Estes períodos sugerem também uma possível relação com o número das manchas solares, ou atividade solar máxima.

Num estudo sobre o  $^{14}\text{C}$  em anéis de árvores, Sonett & Suess (1984) demonstram que as variações seculares do  $\Delta^{14}\text{C}$  nas árvores não são aleatórias, mas sim de natureza solar, em particular para o período de 200 anos.

Lean et al. (1992) e Lean & Rind (1994), em estudos sobre a resposta da temperatura terrestre para uma redução da irradiação solar, acreditam que a redução de 0,25%, apenas, da energia total emitida pelo sol, tenha sido a responsável pelo esfriamento da temperatura média da Terra no período do mínimo de Maunder.

Dutilleul & Till (1992) em seus estudos das reconstruções das temperaturas e precipitações, a partir das séries

temporais dos anéis de árvores, observaram um possível correlação Sol - clima, para o período de 11 anos, em Marrocos.

Os resultados mostram uma relação inversa entre a atividade solar e os cosmonuclídeos  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$ . Os resultados mostram uma possível relação entre a atividade solar e o clima na Terra. Considera-se que a atividade solar teve e têm uma grande influência sobre fenômenos geofísicos e climáticos. Os resultados obtidos aqui e comparados com resultados de outros autores vem apenas reforçar esta hipótese da atividade solar ter uma ligação com fenômenos terrestres.

Torna-se necessário um estudo da fase de cada espectro, a fim de compreender como o clima responde - através dos seus indicadores, tal como a temperatura superficial média da Terra - a um determinado fenômeno geofísico ou uma mudança na atividade solar. Uma análise espectral dinâmica de cada fenômeno mostraria sua evolução com o tempo, possibilitando uma melhor comparação dos fenômenos climáticos e geofísicos na procura de uma relação Sol-clima.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEER, J., OESCHGER, H., FINKEL, R. C., CASTAGNOLI, G. C., BONINI, G., ATTOLINI, M. R. & GALLI, M. -1985-** Accelerator measurements of  $^{10}\text{Be}$ : The 11 year solar cycle from 1180-1800 A.D. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **B10/11**: 415-418.
- BOLIN, B., DEGENS, E. T., KEMPE, S. & KETNER, P. -1979-** The global carbon cycle. New York, John Wiley & Sons.
- BROECKER, W. S. -1993-** Global warming on trial. *TERRA*, The Natural History Museum of Los Angeles County, **31(3)**.
- CLIMATIC RESEARCH UNIT. -1993-** Global temperature falls in 1991. *Tiempo*, University of East Anglia.
- DAMON, P. E., LERMAN, J. C. & LONG, A. -1978-** Long, A. Temporal fluctuations of atmospheric  $^{14}\text{C}$ : Causal factors and implications. *Annual Review of Earth Planetary Science*, **6**:457-494.
- DUTILLEUL, P. & TILL, C. -1992-** Evidence of Periodicities Related To Climate And Planetary Behaviors. In: *Ring-Width Chronologies Of Atlas Cedar (Cedrus Atlantica) in Marocco*. *Canadian Journal Of Forest Research*, **22**: 1469-1482.

- LAMARCHE, V. C. Jr. & HIRSCHBOECK, K. K. - 1984-** Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature*, **307(5947)**:121-126.
- LEAN, J. & RIND, D.- 1994-** Solar variability: implications for global change. *EOS*, **75**, 1-7.
- LEAN, J. SKUMANICH, A. & WHITE, O. -1992-** Estimating the sun's radiative output during the Maunder minimum. *Geophysics Research Letters*, **19**:1591 - 1594.
- MARPLE, S. L. JR. -1987-** Digital Spectral Analysis with Applications. New York, Prentice-Hall.
- MCHARGUE, L. R. & DAMON, P. E. -1991-** The global beryllium 10 cycle. *Reviews of Geophysics*, **29(2)**:141-158.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. -1982-** Carbon dioxide and climate: a second assessment. Washington, DC, National Academic.
- NORDEMAN, D. J. R. -1992-** Search for periodicities in geophysical time series by iterative regression analysis in C. São José dos Campos, INPE, 1992. 20p. (INPE-5420-PRE/1762).
- RAISBECK, G. M. & YIOU, F. -1984-** Production of long-lived cosmogenic nuclei and their applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **B5(2)**:91-99.
- RIGOZO, N. R. -1994-** Análise por regressão iterativa de periodicidades nas variações dos cosmonuclídeos atmosféricos  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$ . Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE.
- SONETT, C. P. & SUESS, H. E. -1984-** Correlation of bristlecone pine ring widths with atmospheric  $^{14}\text{C}$  variations: a climate-sun relation. *Nature*, **307**: 141-143.
- STUIVER, M. & QUAY, P. D. -1980-** Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science*, **207(4426)**:11-19.
- WOLBERG, J. R. -1967-** Prediction analysis. Northland D. Van Nostrand.

Received: July, 1997

Accepted: November, 1998

## ITERATIVE REGRESSION ANALYSIS OF PERIODICITIES IN GEOPHYSICAL RECORD TIME SERIES

The aim of this work was to use an iterative regression analysis method for the determination of periodicities at decade-to-century time scale, in geophysical time series of natural records and observational data involved in climate change. The iterative regression analysis method (Wolberg, 1967; Nordemann, 1992; Rigozo, 1994) may be used for the fitting of any derivable function to experimental data. In this work, it was applied to the determination of the parameters and standard deviation of sine functions embedded in time series. Its features allow to select the most important periodicities with higher amplitude/deviation ratio. Climate change may be influenced by variations of the solar energy flux reaching the Earth, caused either by solar activity or terrestrial natural (such as volcanoes) and artificial (human activities such as fuel burning) phenomena. For these reasons, the method described was applied to several time series: atmospheric cosmonuclides (atmospheric carbon 14 and beryllium 10 of ice cores from Greenland and Antarctica, as possible indicators of the past solar activity), atmospheric volcanic dust data (associated to past volcanic activity) and mean surface air temperatures (as a climatic indicator). The

most interesting periods found were: 215+2 and 125+1 yr ( $^{14}\text{C}$  in Antarctic ice); 211+2 and 123+1 yr ( $^{10}\text{Be}$  in Antarctic ice) and 102+3 yr ( $^{10}\text{Be}$  in Greenland ice). These periods correspond to a periodic increase of cosmonuclide production and deposit in polar cap ice due to solar activity minimum (Wolf, Spörer and Maunder minima) which favored higher galactic cosmic ray flux to the Earth. For Greenland ice  $^{10}\text{Be}$ , three more periods were found: 27.0+0.4, 18.7+0.3 and 12.0+0.1 yr which may be associated to solar-lunar tides, lunar tides and the fundamental solar activity cycle, respectively. The sunspot number spectrum presents, as expected, its more significant period at 11+0.1 yr which is characteristic of solar activity.  $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$  cosmonuclides also present a period in the 200 yr band. The volcanic dust index spectrum presents significant periods at 198+8; 28.7+0.2; 21.7+0.1; 17.4+0.1 and 11+0.1 yr. The 28.7 yr period is very close to the solar lunar tide cycle. The 17.4 yr period also is very close to the lunar tide cycle. The 21.7 and 11 yr periods are also (surprisingly) close to solar cycle periods. Mean surface air temperatures show two interesting periods at 23.1+0.7 and 10.0+0.2 yr, also close to solar cycle periods.

## NOTES ABOUT THE AUTHORS *NOTAS SOBRE OS AUTORES*

### ITERATIVE REGRESSION ANALYSIS OF PERIODICITIES IN GEOPHYSICAL RECORD TIME SERIES

#### **Nivaor Rodolfo Rigozo**

Gradou-se em Física pela Pontifícia Universidade Católica - PUC (1991) de Porto Alegre. Mestre em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (1994) com uma dissertação intitulada "*Análise por regressão iterativa de periodicidades nas variações dos cosmonuclídeos atmosféricos  $^{10}\text{Be}$  e  $^{14}\text{C}$* ". Doutorando no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE com trabalhos sobre "*Registros da atividade solar e de outros fenômenos geofísicos em anéis de árvores*".

#### **Daniel Jean Roger Nordemann**

Formou-se em Engenharia Física pela École

Supérieure de Physique et Chimie Industrielles (ESPCI) de Paris, França em 1957. Bacharel em Física Matemática em 1963 e Doutor em Ciências Físicas em 1966 pela Universidade de Paris, França. Trabalhou na França de 1957 a 1970 e de 1974 a 1979 no Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), onde desenvolveu trabalhos na área da Geofísica Nuclear. Trabalhou como perito da UNESCO, de 1970 a 1973, no Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (IF-UFBA). Desde 1979, trabalha no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) nas áreas de Geofísica Espacial e Geofísica Nuclear. É autor de vários livros entre os quais "*Elementos de Geocronologia Nuclear*" (1972) e "*Introdução ao Mathematica for Windows*" (1994).

### ON THE BASIC TRENDS OF THE UPPER ATMOSPHERE MODELING - A REVIEW

#### **Carlos José Zamlutti**

Pesquisador Senior do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, desde 03/01/1968. Nasceu em Corumbá, MS, Brasil. Bacharelado em Engenharia Eletrônica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1967. Concluiu o mestrado em Ciências Espaciais no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em 1969. Doutorado em Eletrofísica pela Cornell University - Ithaca, NY, USA, em 1973. Foi o primeiro coordenador do INPE Fortaleza após estágio na CNES em Kourou na Guiana Francesa, em 1970. Desenvolveu sua tese de doutoramento no Arecibo Observatory em Puerto Rico em 1972. Trabalhou com previsão de órbitas de satélites, coleta e análise de dados destes. Otimizou a técnica

de múltiplos pulsos para radares incoerentes. Professor de Análise Numérica no INPE. Seus trabalhos mais recentes estão nas áreas de modelagem e física de partículas. Alguns artigos atuais são:

- Transport equations for multicomponent isotropic high speed space plasmas. *Planet. Space Sci.*, 42557-568, 1994.

- On a new computation of the collisional transfer rates for Maxwell molecules interaction. *Rev. Bras. Geofísica*, 12, 191-194, 1994.

- On the effects of the reactive terms in the Boltzmann equation. *Ann. Geophys.* 15, 79-87, 1997.

- Elastic collision terms for transport equations of high flow velocity plasmas. *J. Phys. Appl.* 31, 7112-7116, 1998.