

## ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE PC USANDO WAVELETS

*P. Fernández de Campra<sup>1,3</sup> y M. Zossi de Artigas<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>Laboratorio de Física de la Atmósfera, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Univ. Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 Tucumán, Argentina<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina.<sup>3</sup>Departamento de Ciencias de la Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 Tucumán, Argentina

e-mail: pfernandez@herrera.unt.edu.ar, mzossi@herrera.unt.edu.ar

## RESUMEN

Los índices geomagnéticos proveen un control permanente de los procesos que ocurren en la alta atmósfera y la magnetosfera, representando datos fundamentales en el estudio del clima espacial. En este trabajo se analizan periodicidades y tendencia del índice PC (Polar Cap) usando la transformada wavelet (ondeletas). Este índice registra la actividad magnética llamada DP2, asociada con el sistema de corriente equivalente en el casquete polar. Se analizan valores promedios mensuales del índice, correspondientes al observatorio de Thule, durante el período 1975-2000.

Entre las periodicidades, se destaca una de 8,7 años, observada en la aproximación con un aporte del 44% a la varianza total de la serie. Además se distinguen en los distintos detalles oscilaciones alrededor de los 3 meses, 6 meses, 1 año, la cuasibienal y una alrededor de 5,2 años.

En la búsqueda de las posibles causas de los ciclos detectados se consideran promedios mensuales de la velocidad del viento solar y de la intensidad del campo magnético interplanetario en el período estudiado. La periodicidad de 8,7 años se observa con gran significancia en los valores correspondientes a la intensidad del campo magnético interplanetario, que correspondería al período más corto del ciclo solar de 11 años. Los resultados se comparan con los obtenidos anteriormente para otros índices geomagnéticos usando distintas técnicas de análisis. Las causas de las periodicidades detectadas en el índice PC, podrían estar vinculadas con variaciones en el sol.

**Palabras Claves:** índice PC-transformada wavelet (onditas)-viento solar-campo magnético interplanetario

## ABSTRACT

The geomagnetic indices provide a permanent control of the processes that take place in the upper atmosphere and the magnetosphere, being an important data set in the study of space weather. In the present work, periodicities and trends of the Polar Cap index, PC, are analyzed using the Wavelet transformed. This index registers the magnetic activity DP2, associated with the equivalent current system of the polar cap. Monthly mean values of the index are analyzed, corresponding to the observatory of Thule, during the period 1975 -2000.

Among the periodicities, one of 8.7 years stands out, with a 44% contribution to the total variance of the series. Oscillations around 3 months, 6 months, 1 year, quasi-biennial and around 5.2 years are distinguished.

In the search of possible causes of the detected cycles, monthly averages of the solar wind velocity and of the intensity of the interplanetary magnetic field are considered. The 8.7 years periodicity is observed with great significance in the values corresponding to the intensity of the interplanetary magnetic field that it would correspond to the shortest period in the 11 years solar cycle. The results are compared with those obtained previously for other geomagnetic indices. The causes of the periodicities detected in PC index, could be linked with variations in the sun.

**Keywords:** PC index-wavelet transform-solar wind-interplanetary magnetic field

## INTRODUCCION

El estudio de las periodicidades presentes en diferentes índices geomagnéticos y su asociación con la actividad solar y otros parámetros cíclicos, así como la influencia en el medio ambiente terrestre, ha sido objeto de muchos trabajos (Clua de Gonzalez *et al.*, 1993, Gazis *et al.*, 1995, Paularena *et al.*, 1995, Vennerstrom y Friis-Christensen, 1996, Kane, 1997, Mursula *et al.*, 1997, Rangarajan y Araki, 1997, Rangarajan y Iyemori, 1997, Mursula and Zieger, 2000, Rangarajan and Barreto, 2000, Richardson *et al.*, 2002, Echer *et al.*, 2004, Makarova y Shirochkov, 2004). Algunos de estos autores han considerado el hecho de que el comportamiento cíclico en la actividad geomagnética no es constante en el tiempo. Kane (1997) separó las series de datos en intervalos correspondientes a cada ciclo solar, y trabajó utilizando el análisis espectral de máxima entropía (maximum entropy spectral analysis), Rangarajan y Araki (1997) y Rangarajan y Barreto (2000) usaron el análisis de espectro singular (Singular Spectrum Analysis, SSA), que considera las variaciones con el tiempo de un patrón periódico.

Un índice que nos permite registrar la actividad magnética en altas latitudes es el índice PC (Polar Cap), basado en una idea de Troshichev (Troshichev *et al.*, 1979) y desarrollado en trabajos de Troshichev y Andrezen (1985), Troshichev *et al.* (1988), y Vennerstrom *et al.* (1991). Este índice monitorea la actividad magnética en el casquete polar generada por parámetros como la componente hacia el sur del CMI,  $B_z$ , la componente azimutal,  $B_y$ , (Friis-Christensen *et al.*, 1972) y la velocidad del viento solar. El objetivo de este trabajo es el análisis de las periodicidades y tendencia que presenta el índice PC, utilizando para ello el método de wavelets (onditas) que permite estimar la variación que ellas presentan en el tiempo.

## METODO DE ANALISIS

El análisis de wavelets representa una alternativa cuando los aspectos espectrales son dependientes del tiempo, ya que permite obtener información sobre la ubicación temporal de las frecuencias. En este trabajo, se uso la ondita Daubechies (Daubechies, 1990) de orden 7, esta familia es muy usada por que posee soporte compacto, lo que favorece el análisis de multiresolución. En este tipo de análisis se descompone la señal original en sucesivos niveles de aproximaciones y detalles. Si denominamos  $S$  a la señal original, y si  $j$  indica el nivel,  $A_j$  representa la aproximación  $j$ -ésima que considera las frecuencias bajas, mientras que  $D_j$  el detalle  $j$ -ésimo muestra las frecuencias altas.

$$\begin{aligned} S &= A_1 + D_1, \\ &= A_2 + D_1 + D_2 \\ &= A_3 + D_3 + D_2 + D_1 \end{aligned}$$

Vemos que la diferencia entre dos aproximaciones sucesivas está dada por el detalle correspondiente. A partir de estos valores se puede reconstruir la señal, haciendo el proceso inverso. Una propiedad de las onditas es que conservan la energía, es decir que la varianza de la serie se puede estimar en función de los coeficientes de la transformación discreta de onditas, así podemos estimar en que porcentaje aportan cada uno de los componentes, detalles y aproximación, a la varianza total de la serie.

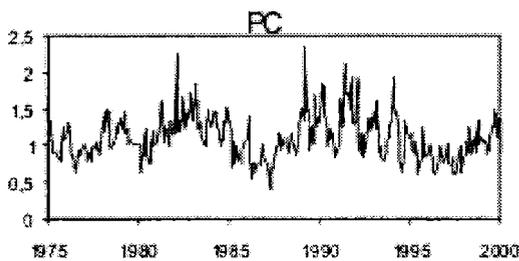
## ANALISIS DE LOS DATOS

El índice PC se calcula a partir de la máxima perturbación horizontal,  $H$  en nanotesla, nT, medida en una única estación ubicada muy cerca del polo geomagnético. Este índice se calcula independientemente para dos estaciones: Thule (85,4° de latitud CGM), situada en la aldea Qaanaaq en Gro-

enlandia y Vostok ( $-83,4^\circ$  de latitud CGM) en la Antártida. La IAGA lo adoptó oficialmente en 1999. Se trabajó con los promedios mensuales del índice PC durante el período 1975-2000 (Fig. 1), obtenidos en la estación Thule (National Geophysical Data Center-NOAA, Estados Unidos). Los datos de Vostok fueron descartados porque se trata de una serie incompleta.

El análisis de multiresolución se realizó usando el toolbox Wavelet del paquete MATLAB. Como la serie analizada posee 313 datos, el método permite alcanzar sólo un nivel 5 de descomposición. A fin de estimar la contribución espectral de cada banda obtenida en el análisis de multiresolución, se realizó análisis discreto de Fourier de cada componente. La reconstrucción de las distintas componentes se muestra en las Figuras 2 a-f y los modos espectrales correspondientes en las Figuras 2 g-l. Se utilizó distintas escalas temporales en los gráficos para observar mejor las periodicidades más chicas. Se consideraron las periodicidades significativas al 99 % (el nivel de significancia es indicado con línea de trazos en las Figuras).

El principal aporte a la varianza de la serie lo hace la aproximación 5 (Fig. 2a), en el orden del 44 %, mostrando picos en 5,2 y 8,7 años aproximadamente (Fig. 2g). En el detalle 1 (Fig. 2b) (13% de aporte a la varianza) se distingue una banda alrededor de los 3 meses (Fig. 2h). En el espectro del detalle 5 (Fig. 2i) (12 % de aporte a la varianza) se destaca una



**Figura 1.** Valores mensuales del índice PC, medido en Thule, período 1975-2000.

frecuencia de aproximadamente 5,2 años. En el detalle 4 (Fig. 2d) (11 % de aporte a la varianza) se observa una banda comprendida entre 1,4 y 2,6 años (Fig. 2j). El detalle 3 (Fig. 2e) (también con 11 % de aporte a la varianza) muestra claramente una banda centrada en los 12 meses (Fig. 2k), mientras que en el detalle 2 (Fig. 2) (9 % de aporte a la varianza) la oscilación es alrededor de 6 meses (Fig. 2l) observándose una mayor amplitud en el espectro alrededor de 1990.

Con el objeto de explicar los resultados obtenidos se analizaron promedios mensuales de la velocidad del viento solar,  $v$ , y la intensidad del campo magnético interplanetario,  $B$ , en el período en estudio (Fig. 3 a-b).

Se realizó análisis de multiresolución de estos datos, usando la ondita Daubechies 7, y hasta un nivel 5 de descomposición. Estos datos fueron obtenidos de la Base de Datos del NSSDC OMNI (OMNIWeb at National Space Science Data Center). Se observa que ambos parámetros presentan las periodicidades detectadas en PC, excepto la oscilación de 8,7 años, que solo se encuentra en  $B$ .

## ANÁLISIS DE LAS PERIODICIDADES ENCONTRADAS

**Ciclo ~ 0,5 año:** La actividad geomagnética tiene una variación semianual con actividad incrementada cerca de los equinoccios (Chapman y Bartels, 1940, Fraser-Smith, 1972, Russell y McPherron, 1973). La causa posible ha sido un punto de debate y fue revisada por varios autores (Murayama, 1974, Crooker *et al.*, 1992, Schreiber, 1998, Cliver *et al.*, 2000) quienes coincidieron en tres causas:

i) el efecto axial, que es la variación de la posición de la Tierra en latitud heliográfica y el incremento en la velocidad del viento solar a mayores latitudes heliográficas

ii) el efecto equinoccial, que es la variación del ángulo del dipolo terrestre con respecto a

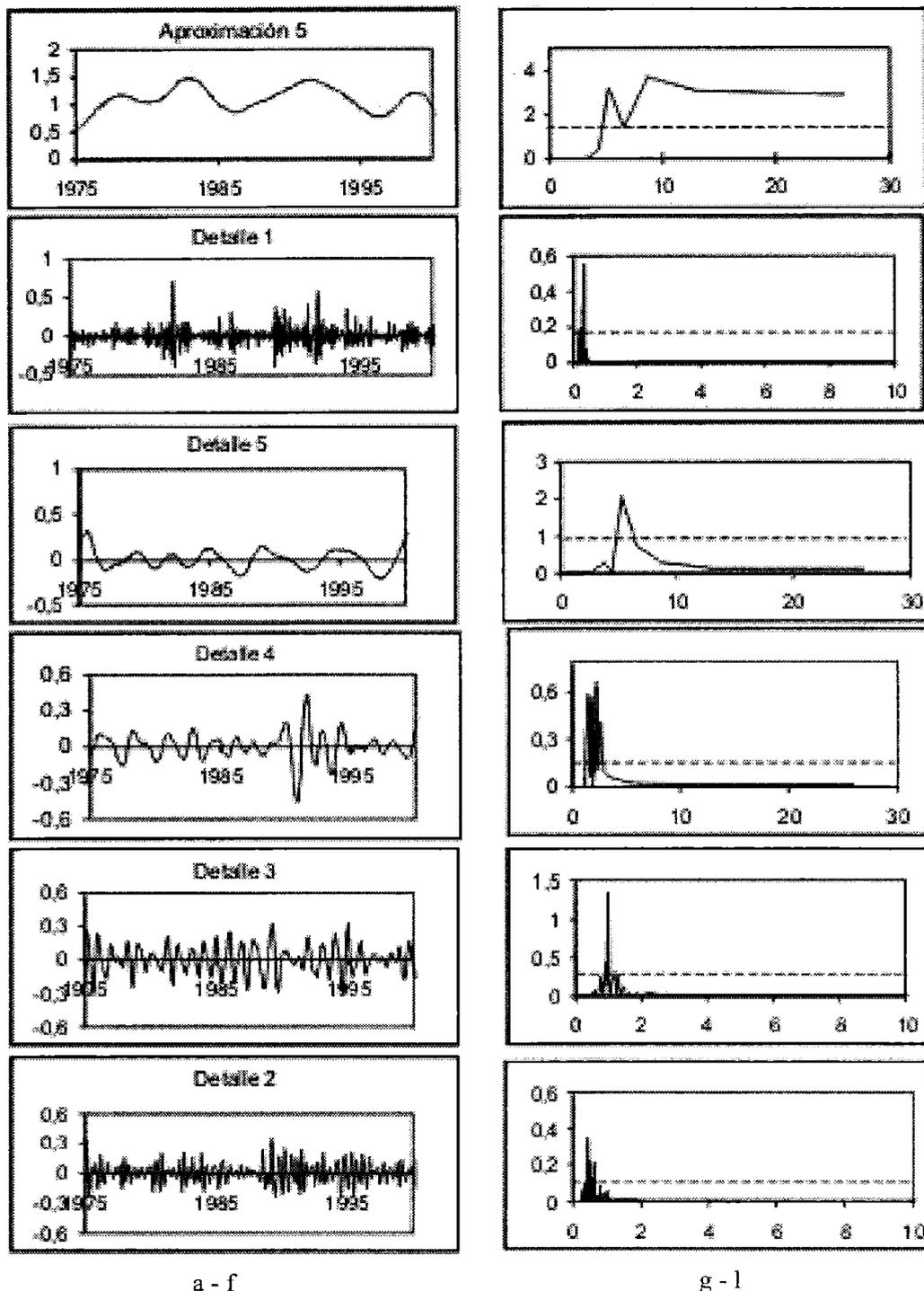
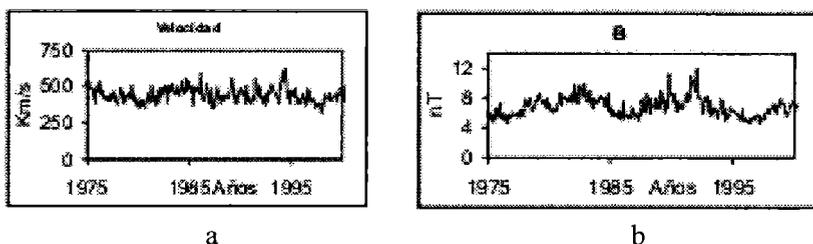


Figura 2. Reconstrucción de las componentes, detalles 1 a 5 y aproximación 5 (a-f), de la serie de valores mensuales del índice PC y los espectros correspondientes (g-l), calculados con Fourier.



**Figura 3.** Valores mensuales de velocidad del viento solar (a) y de intensidad del campo magnético interplanetario, B (b), durante el período 1975-2000.

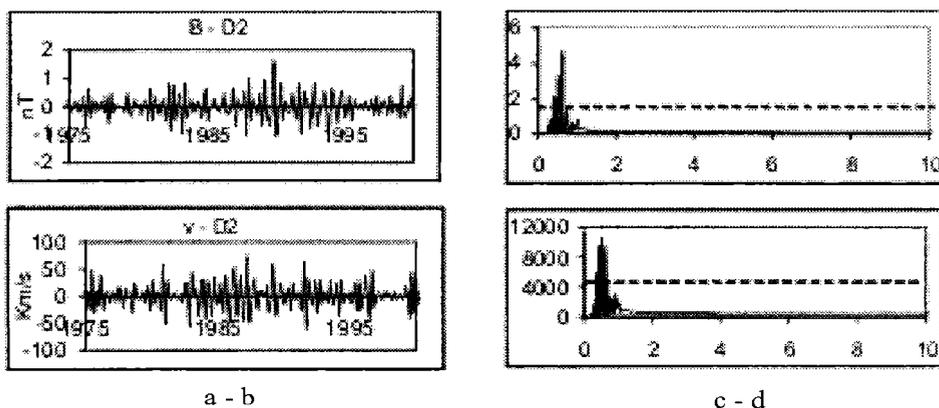
la línea Sol-Tierra o a la dirección de la velocidad del viento solar y esto determina una eficiencia variable en el acoplamiento con el viento solar

iii) el efecto de Russell-McPherron, efecto debido a una mayor componente Z del campo magnético interplanetario, en coordenadas solar magnetosféricas (GSM), cerca de los equinoccios, lo cual es debido a la inclinación del eje dipolar terrestre con respecto al plano ecuatorial heliográfico.

Los dos parámetros analizados presentan esta oscilación, aunque su variación temporal es diferente a la observada en los índices analizados. Los gráficos correspondientes a las distintas reconstrucciones y sus respectivos espectros se muestran en las Figuras 4 a-d.

**Ciclo anual y cuasi-periodicidades entre 1 - 2 años:** La periodicidad anual encontrada

en el índice PC, observada en el detalle 3, estaría relacionada con una periodicidad análoga en la velocidad del viento solar (Zieger y Mursula, presentado en el European Meeting in Solar Physics, 1999), con una mayor amplitud en la fase de descenso de cada ciclo solar, acercándose al mínimo, como se observa en la Figura 5-a. El índice PC muestra este mismo patrón, con características similares en la fase de ascenso del ciclo 22. Respecto a la banda mostrada por el detalle 4, Figura 2d, en ella se observan casi con igual amplitud las periodicidades de 1,4, y 1,7 años, presentes en todo el período estudiado, aunque disminuyendo su intensidad durante el ciclo 21, coincidiendo con los resultados obtenidos por Mursula y Vilppola (2004) para la velocidad del viento solar, parámetro que interviene en la definición del índice. Este comportamiento es observado en la Figura 5b,



**Figura 4.** Reconstrucción del detalle 2 de la multiresolución, para la velocidad del viento solar, (a) y la intensidad del campo (b) y los respectivos espectros (c-d)

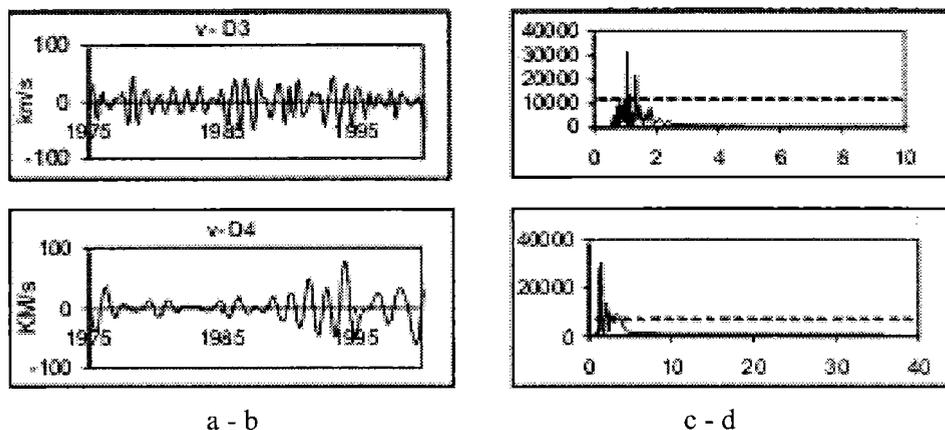


Figura 5. Reconstrucción de los detalles 3 y 4 del análisis de multiresolución, de la velocidad del viento solar, 1975-2000 (a-b) y los respectivos espectros (c-d)

que muestra estas periodicidades en los datos del viento solar.

**Oscilación cuasi-bienal:** Varios autores han identificado una oscilación cuasi-bienal (QBO, Quasi-Biennial Oscillation) en la actividad geomagnética durante períodos tranquilos analizando datos de estaciones de latitud baja y media. Entre ellos, Yacob y Bhargava (1968) indicaron que su origen era una periodicidad bienal en la radiación UV del sol; Raja Rao y Joseph (1971) sugirieron una asociación entre su mecanismo y el electrochorro ecuatorial. Olsen (1994) y Olsen y Kiefer (1995) postularon que la QBO observada en las variaciones geomagnéticas podían estar causadas por la acción dinámico de una QBO en los vientos de la termosfera baja. Rangarajan y Iyemori (1997) detectaron esta oscilación en los índices geomagnéticos

Ap y Kp, significativa en períodos coincidentes con la oscilación de 1,3 años y la asociaron con la velocidad del viento solar.

Esta oscilación se detecta en el índice PC, Figura 2d, con una banda entre 2,1 y 2,6 años, de amplitud constante hasta el año 1989. Al analizar los parámetros interplanetarios, en la velocidad del viento se observa una periodicidad entre 2 y 2,5 años, aunque con poca amplitud en el espectro, Figura 5d; mientras que en B se destaca una periodicidad alrededor de los 25 meses, Figura 6.

**Ciclo de ~ 5 años:** Esta banda alrededor de los 5 años, que se observa en el índice PC, Figura 2c, es detectada en la velocidad del viento solar y en la intensidad del campo magnético interplanetario, B, (Rangarajan y Barreto, 2000), así como en el índice aa por

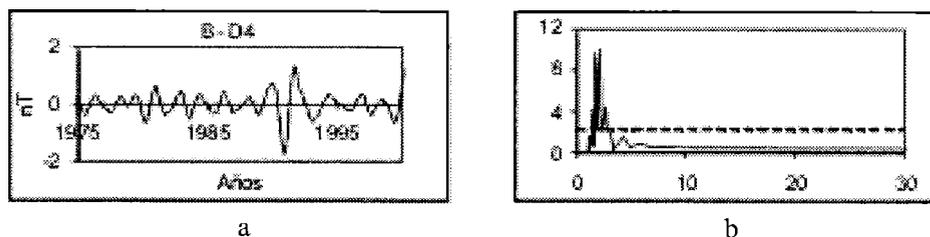


Figura 6. Reconstrucción del detalle 4 de la intensidad del campo, B, (a) y el espectro correspondiente (b).

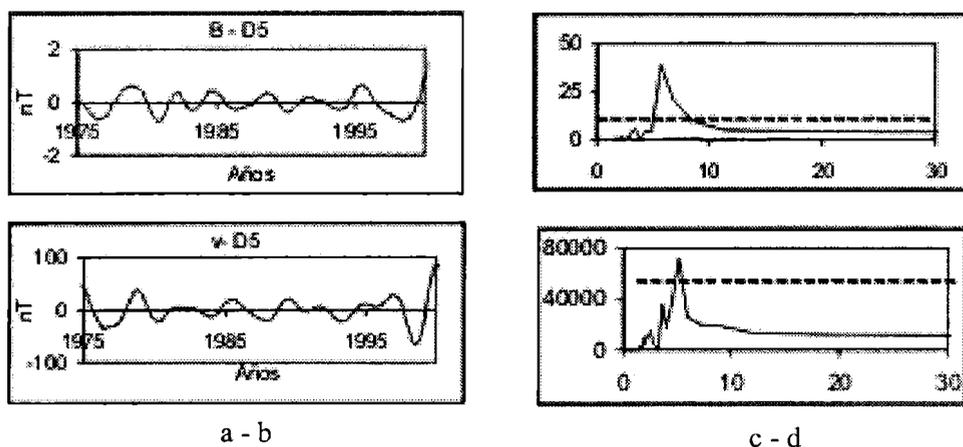
Echer *et al.* (2004). Algunos autores consideran que la periodicidad de 5,5 en la actividad solar, indicada por Rz, es la segunda armónica del ciclo de 11 años (Sugiura, 1980), mientras que Mursula *et al.* (1997), atribuyen esta periodicidad en los índices geomagnéticos a propiedades del viento solar. En el análisis de los parámetros interplanetarios se obtienen periodicidades alrededor de 5,6 años en B y de 5,1 años en la velocidad, ambas con gran amplitud en el espectro, Figura 7 a-b.

**Ciclo de ~ 8,7 años:** Esta periodicidad se observa en la aproximación de la serie de datos del índice PC (Fig. 2g) con un aporte importante a la varianza de la serie (del orden de 44%). Es también observada con gran significancia en la serie de valores de la intensidad del campo magnético interplanetario, B,

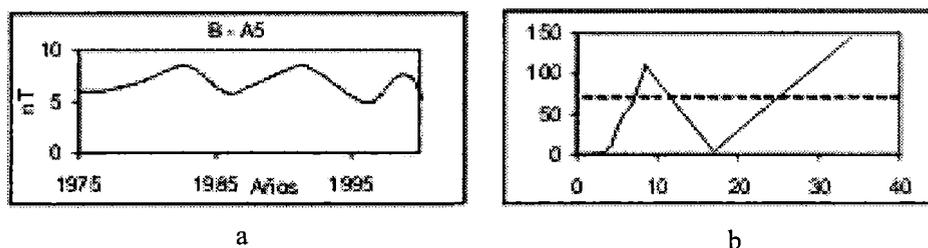
Figura 8b. Según Herman y Goldberg (1978) correspondería al período más corto del ciclo de 11 años. Esta relación es la esperada si se considera que el índice PC es una medida de la transferencia de energía del viento solar en la magnetosfera.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó la transformada Wavelet con el fin de analizar las periodicidades presentes en la serie de promedios mensuales del índice PC. De los resultados obtenidos, se desprende que la variabilidad de la actividad geomagnética en altas latitudes está determinada principalmente por la actividad del sol. Observamos que la principal periodicidad encontrada es de 8,7 años, en concordancia con una encontrada en la inten-



**Figura 7.** Reconstrucción del detalle 5 de la intensidad del campo, B, y de la velocidad del viento solar (a-b) y espectros correspondientes (c-d).



**Figura 8.** Reconstrucción de la aproximación 5 (a) del análisis de multiresolución de los valores mensuales del campo, B, y el espectro (b)

sidad del campo magnético interplanetario, B. Respecto a la variación a largo plazo, el espectro no muestra una tendencia significativa, Figura 2g, probablemente debido al corto período estudiado (26 años).

La disponibilidad de series de datos registrados por satélites en el medio interplanetario y el conocimiento de su variabilidad, constituye un aporte importante en la búsqueda de los agentes responsables del comportamiento del índice analizado.

Con el objeto de detectar otras posibles causas de las oscilaciones encontradas en este análisis se consideraran parámetros atmosféricos, ya que algunos de ellos presentan un comportamiento en el tiempo, similar al observado en el índice estudiado.

#### REFERENCIAS

- Chapman, S. and J. Bartels. 1940. *Geomagnetism*, Chapter II. Oxford Univ. Press, New York.
- Cliver, E., Y. Kamide and A. Ling. 2000. Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 106, 2413.
- Clua de Gonzalez, A.L., W.D. Gonzalez and S.L.G. Dutra. 1993. Periodic variation in the geomagnetic activity: A study based on the Ap index. *J. Geophys. Res.*, 98: 9215-9231.
- Crooker, N.U., E.W. Cliver and B.T. Tsurutani. 1992. The semiannual variation of great geomagnetic storms and the postshock Russell-McPherron effect preceding coronal mass ejecta. *Geophys. Res. Lett.*, 19: 429-432.
- Daubechies, I. 1990. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Transactions Inf. Theory*, 36: 961-1005.
- Echer, E., W.D. Gonzalez, A.L.C. Gonzalez, A. Prestes, L.E.A. Vieira, A. Dal Lago, F.L. Guarnieri and N.J. Schuch. 2004. Long Term Correlation between solar and Geomagnetic Activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 66: 1019-1025.
- Fraser-Smith, A. 1972. The spectrum of geomagnetic activity index Ap. *J. Geophys. Res.*, 77: 4209-4220.
- Friis-Christensen, E., K. Lassen, J. Wilhelm, J. M. Wilcox, W. Gonzalez and D. S. Colburn. 1972. Critical component of the interplanetary magnetic field responsible for large geomagnetic effects in the polar cap. *J. Geophys. Res.*, 77: 3371-3376.
- Gazis, P.R., J.D. Richardson and K.I. Paularena. 1995. Long term periodicity in solar wind velocity during the last three solar cycles. *Geophys. Res. Lett.*, 22: 1165-1168.
- Herman, J. and R. Goldberg. 1978. *Sun, Weather y Climate*. NASA SP-426, Washington.
- Kane, R.P. 1997. Quasi-biennial and quasi-triennial oscillations in geomagnetic activity indices. *Ann. Geophysicae*, 15: 1581-1594.
- Makarova, L.N. and A.V. Shirochkov. 2004. The Sun and the solar wind variability of different time-scales and the climate dynamics. *Adv. Space Res.* 432-435.
- Murayama, T. 1974. Origin of the semiannual variation of geomagnetic Kp indices. *J. Geophys. Res.*, 79: 297-300.
- Mursula, K., I. Usoskin, I. and B. Zieger. 1997. On the claimed 5.5-year periodicity in solar activity. *Solar Physics*, 176: 201-210.
- Mursula, K. and J.H. Vilppola. 2004. Fluctuations of the solar dynamo observed in the solar wind and interplanetary magnetic field at 1 AU and in the outer heliosphere. *Solar Physics*, 221: 337-349.
- Mursula, K. and B. Zieger. 2000. The 1.3 year variation in solar wind speed and geomagnetic activity. *Adv. Space Res.*, 25, 1939.
- Olsen, N. 1994. A 27-month periodicity in the low latitude geomagnetic field and its connection to the stratospheric QBO. *Geophys. Res. Lett.*, 21: 1125-1128.
- Olsen, N. and M. Kiefer. 1995. Geomagnetic daily variations produced by a QBO in thermospheric prevailing winds. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57: 1583-1589.
- Paularena, K.I., A. Szabo and J.D. Richardson. 1995. Coincident 1.3 year in the ap geomagnetic index and the solar wind. *Geophys. Res. Lett.*, 22: 3001-3004.
- Raja Rao, K.S. and K.T. Joseph. 1971. Quasi-biennial oscillation in the geomagnetic Sq field in the low latitude region. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 33: 797-805.

- Rangarajan, G.K. and T. Araki. 1997. Multiple timescales in the fluctuations of the equatorial Dst index through singular spectrum analysis. *Journal Geomagnetic Geoelectr.*, 3-20.
- Rangarajan, G.K. and L.M. Barreto. 2000. Long term variability in solar wind velocity and IMF intensity and the relationship between solar wind parameters & geomagnetic activity. *Earth Planets Space*, 52: 121-132.
- Rangarajan, G.K. and T. Iyemori. 1997. Time variations of geomagnetic activity indices Kp and Ap: an update. *Ann. Geophysicae* 15: 1271-1290.
- Richardson, I.G., E.W. Cliver, and H.V. Cane. 2002. Long-term trends in the interplanetary magnetic field strength and solar wind structure during the twentieth century. *J. Geophys. Res.* 107, 1304, doi:10.1029/2001JA000507.
- Russell, C.T. and R.L. McPherron. 1973. Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 78: 92-108.
- Schreiber, H. 1998. On the periodic variations of geomagnetic activity indices Ap and ap. *Ann. Geophysicae*, 16: 510-517.
- Sugiura, M. 1980. What Do We Expect in Magnetic Activity in the Current Solar Cycle?. *EOS Trans. AGU*, 61(43), 673.
- Troshichev, O.A. and V.G. Andrezen. 1985. The relationship between interplanetary quantities and magnetic activity in the southern polar cap. *Planet. Space. Sci.*, 33: 415-419.
- Troshichev, O.A., V.G. Andrezen and S. Vennerstrom. 1988. Magnetic activity in the polar cap- A new index. *Planet. Space. Sci.*, 36: 1095-1102.
- Troshichev, O.A., N.P. Dmitrieva and B. M. Kuznetsov. 1979. Polar cap magnetic activity as a signature of substorm development. *Planet. Space. Sci.*, 27: 217-221.
- Vennerstrom, S., E. Friis-Christensen, O.A. Troshichev and V.G. Andresen. 1991. Comparison between the Polar Cap Index, PC, and Auroral Electrojet Indices AE, AL and AU. *J. Geophys. Res.*, 96, 101-113.
- Vennerstrom, S. and E. Friis-Christensen. 1996. Long-term and solar cycle variation of the ring current. *J. Geophys. Res.*, 101: 24727-24732.
- Yacob, A. and B.N. Bhargava. 1968. On 26-month periodicity in quiet-day range of geomagnetic horizontal force and in sunspot number. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 30: 1907-1911.