

# ESTUDIO DE PERIODICIDADES EN LA TASA DE OCURRENCIA DE FULGURACIONES - GAMA Y EN ÁREAS DE MANCHAS SOLARES DURANTE LA MISIÓN CGRO

A.M. Silva<sup>1,2\*</sup>, And S.S. Duhau<sup>1,3</sup>

1: Laboratorio de Geofísica (LAGE) Ciudad Universitaria, Pab I S/N, Depto. de Física CP 1428, Buenos Aires, Argentina. duhau@df.uba.ar, adriansilva@ciudad.com.ar

2. Ciclo Básico Común, Cátedra de Física, Universidad de Buenos Aires

3. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires

La aparición de la periodicidad cercana a 160 días en las fulguraciones solares en un amplio rango de energías desde los rayos X a las ondas de radio ha sido objeto de numerosas observaciones. Las causas de esta periodicidad están en discusión, en particular, la sincronía de la aparición de esta periodicidad en las áreas de las manchas solares con las fulguraciones más intensas durante los máximos de los ciclos 16 a 21, ha sido explicada por la desestabilización del dinamo solar, debida a la emergencia de flujo magnético cerca de ciertos máximos.

Con el objetivo de estudiar los periodos presentes cerca de los máximos del ciclo 22 y 23, se ha realizado un análisis multi-resuelto mediante ondeletas de Morlet en la tasa de ocurrencia de fulguraciones solares energéticas en el rango 20 KeV -1,2 MeV, registrados por el instrumento BATSE (The burst and transient source experiment) a bordo del Compton Gamma Ray Observatory CGRO desde 04/1991 hasta 05/00. Un procedimiento similar fue llevado a cabo con las áreas de las manchas solares durante el mismo lapso.

En coincidencia con recientes hallazgos en datos de flujo magnético, la periodicidad de 160 días en la tasa de ocurrencia de fulguraciones y en el área total de las manchas en el lapso 1991-2000 es sólo marginal cerca del máximo del ciclo 22 pero esta presente en las áreas cerca del máximo del ciclo 23, aumentando en intensidad. Hemos encontrado en cambio armónicos de esta periodicidad en el ciclo 22, y con menor potencia en el 23. lo que indica transferencia de energía entre armónicos del modo fundamental. Se ha encontrado también un aumento del campo magnético promedio en el máximo del ciclo 22. Este comportamiento es sincrónico con el inicio de una transición caótica descendente alrededor del año 1993. Se discute la relevancia de estos resultados respecto de la evolución del dinamo solar

The sporadic occurrence of the near 160 day periodicity in solar fulgurations in a wide range of energies from X-rays to radio waves and sunspots areas has been the subject of many observations. The causes of this periodicity are under discussion. In particular the synchronicity of its occurrence in total sunspot areas and intense fulgurations during sunspot cycle maxima 16 to 21 has been attributed to the destabilization of solar dynamo due to the emergence of new magnetic flux.

To further investigate this phenomena, we perform a multi-resolution analysis based in the Morlet wavelet transform of the evolution of the 160-days periodicity in total sunspot areas and in the rate of occurrence of energetic fulguration (20 KeV -1,2 MeV), recorded by BATSE (The burst and transient source experiment) on board of Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) since 04/1991 to 05/2000. Total sunspot area time series is also examined during the same period by a similar procedure.

In agreement with recent results on magnetometer data we find that the occurrence of the 160 day periodicity in fulgurations and total sunspot area in the period 1991-2000, appears only marginally near maximum during sunspot cycle 22 but it is present in the sunspot cycle 23, intensifying during its maximum. On the other hand we have found strong harmonics of the periodicity in sunspot cycle 22 and, weaker during cycle 23, that indicate energy transfer between modes of the same fundamental mode. We have found also an increase of the average magnetic field intensity along cycle 22 maximum. This behavior is synchronic with a chaotic descending transition that solar dynamo system started near 1993.- The relevance of these results regarding to solar dynamo evolution is discussed.

## I. INTRODUCCIÓN

En 1984 Rieger<sup>(1)</sup> et al empleando datos del espectrómetro GRS a bordo del Solar Maximum Mission SMM detectó una periodicidad de 154 días en la ocurrencia de fulguraciones en rayos X duros. La misma también es observada en datos del satélite GOES (Geosynchronous Operational Environmental Satellites) para el ciclo 21. Allí surge la motivación de estudiar si ésta es persistente después del plazo de observación del SSM, y se plantea la pregunta sobre el lugar de origen y su naturaleza. Rieger especula con un origen en las capas más profundas del sol. Posteriormente se encontró que esta periodicidad aparece persistentemente en X-

(Dennis<sup>(2)</sup>),  $\gamma$  (Verma et al<sup>(3)</sup>) y radio fulguraciones (Bogart & Bai<sup>(4)</sup>, 1985), así como en las áreas de manchas solares (Lean<sup>(5)</sup>), durante el ciclo solar 19 -21.

Una relación de fase correspondiente a un período de 155 días entre el ciclo 21 y 22 es hallada por Brueckner y Cook<sup>(6)</sup>, mientras que Bai y Cliver<sup>(7)</sup> encuentran esta periodicidad en explosiones de protones durante los ciclos 19 a 21. Desde entonces se han sugerido varias interpretaciones de esta periodicidad. Sturrock y Bai<sup>(8)</sup> incluyen este período dentro de un complejo de periodicidades encontradas en parámetros de la actividad solar, en el que aparecería como una banda lateral de subarmónicos de un período

\* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

fundamental de 12.072 días, o aún de 25.50 días (Bai y Sturrock<sup>(9)</sup>). Este período fundamental indicaría la presencia de un "reloj" en el interior del sol, que podría estar controlado por un rotador asimétrico. Bai<sup>(10)</sup> estudiando la distribución de energía de fulguraciones registrados por el SSM, especula que la periodicidad de 154 días es debida a un patrón de convección global, representando movimientos de células convectivas gigantes en el interior del sol.

En 1998 Oliver et al<sup>(11)</sup> realizan el primer análisis empleando wavelets, de la tasa de ocurrencia de fulguraciones y de áreas de manchas solares durante los ciclos 16 a 21 y encuentran que la periodicidad aparece en el ciclo 16, es máxima en el ciclo 19 y desaparece completamente después del ciclo 21. El sincronismo de esta aparición esporádica de la periodicidad con un evento de ascenso caótico en la actividad solar y magnética hallado por Duhau<sup>(13)</sup> y Duhau and Chen<sup>(14)</sup>, indica que, como fue sugerido por Oliver et al la periodicidad de 158 días está relacionada con la desestabilización del dínamo debida a la emergencia de nuevo flujo magnético durante los ciclos 16 a 21.

Oliver et al. sitúan la región de origen de las periodicidad de 154-160 días en la fotosfera cerca de estructuras magnéticas compactas relacionadas con las manchas solares y señalan la importancia de realizar un seguimiento con herramientas de análisis similares, que podrían pronosticar la aparición de cascadas de fulguraciones energéticas. Estos fenómenos son de gran interés debido a los severos efectos que producen en el clima espacial y en el entorno terrestre (comunicaciones, electrónica a bordo de satélites, perturbaciones ionosféricas, etc.). En un análisis posterior, Ballester<sup>(15)</sup> et al. estudian exhaustivamente esta periodicidad en el número de manchas solares y en las áreas durante los ciclos 16 a 22, encontrando que en este último la periodicidad desaparece. El rango de periodos considerados en este trabajo se limita al intervalo 140-180 días, al igual que Oliver et al.

Finalmente, Ballester<sup>(16)</sup> et al analizan la periodicidad en el flujo magnético fotosférico empleando el índice MWSI (Monte Wilson Solar Index) y el KPFM (Kitt Peak magnetic flux) del National Solar Observatory (NSO), encontrando un pico significativo de 160 días en el espectro de potencias en el ciclo 21, y una aparición marginal entre 1990 y 1992 de un pico cercano a los 152 días. La periodicidad en índices magnéticos MWSI comienza a aparecer nuevamente en el ciclo 23 aunque en el análisis citado cae fuera del COI (cone of influence). El rango de periodos cubiertos es de 100 a 200 días. En ese trabajo se relaciona esta periodicidad con la aparición de nuevas manchas solares dentro de grupos ya formados, con la consecuente reconexión de líneas de campo magnético del flujo viejo y el nuevo que emergería. Este mecanismo sería capaz de disparar la ocurrencia de fulguraciones energéticas tal como los registrados por los satélites SMM y GOES.

En el presente trabajo se analizan por primera vez datos en fulguraciones de rayos gamma registrados por la misión CGRO durante 1991-2000 mediante el formalismo de wavelets para analizar las escalas predominantes en el rango de 10-1000 días, es decir

con un ancho de banda mas amplio que en los trabajos citados. La evolución de las periodicidades presentes en estas fulguraciones son comparadas con la evolución de las mismas en el área total de manchas solares durante el mismo lapso y dicho análisis se extiende hasta el ciclo 23 para las manchas solares. Además se estudia la evolución del campo magnético medio alrededor de los máximos en los ciclos 21, 22 y 23. Los resultados se comparan con los obtenidos por Ballester et al.<sup>(15)</sup> y<sup>(16)</sup> para estudiar las condiciones de aparición de la periodicidad cercana a 160 días, su evolución y su posible origen.

## II. ANÁLISIS DE DATOS

### a) Bases de datos

El satélite Compton Gamma Ray Observatory CGRO de NASA operó entre el 19-04-1991 hasta el 15-05-2000, bajo la supervisión del Solar Data Base Center SDAC, y los datos del instrumento BATSE son liberados en el sitio [batse.solar.data.nasa.gov/batse.html](http://batse.solar.data.nasa.gov/batse.html). La base de datos presenta datos diarios de ocurrencia de fulguraciones en el rango de 20 KeV a 1 MeV, la duración individual y el pico de energía (cuentas/sec). La evolución de la tasa de ocurrencia durante el período de observación se muestra en la figura 1. Los datos del CGRO han sido procesados para realizar un análisis wavelet de la tasa de ocurrencia de gamma-fulguraciones.

La base de datos de áreas de manchas solares se puede obtener del National Geophysical Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html>. Las áreas se listan como áreas integradas diarias de manchas totales, y discriminadas en manchas del hemisferio sur y norte solar. Los datos de intensidad de campo magnético solar empleados en este trabajo, provienen del NSO/Kitt Peak magnetic data y son producidos en cooperación por NSF/NOAO, NASA/GSFC y NOAA/SEL. Estos datos son promediados sobre todo el disco solar y corregidos por ruido instrumental.

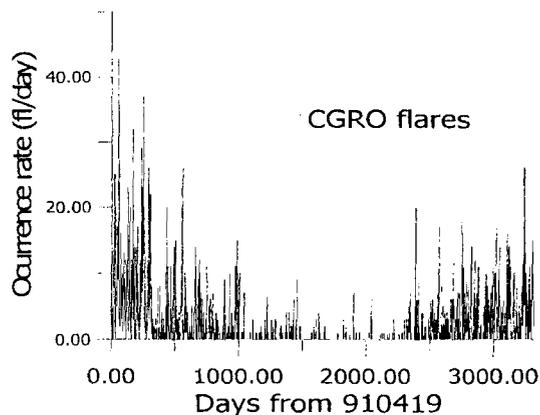


Figura 1: Tasa de ocurrencia de  $\gamma$ -flares detectados por Batse a bordo del CGRO, desde abril de 1990 hasta mayo de 2000.

## b) Método de análisis

Hemos realizado un análisis wavelet multiresuelto empleando la función generadora compleja de Morlet:

$$\Psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

Donde  $t$  es el tiempo y  $\omega_0$  es el parámetro de frecuencia adimensional.

La elección de escalas se realizó de modo de introducir la frecuencia de 75 nHz (período de 157 días) como una de las escalas fundamentales.

Es conveniente generar las escalas de acuerdo con las potencias crecientes de dos, tal como se especifica en Torrence y Compo<sup>(17)</sup>

$$S_j = S_0 2^{j\delta_j} \quad j = 0, 1, \dots, J \quad (2)$$

Donde  $S_0$  es la menor escala resoluble, que se ha tomado en este trabajo igual a 2 días. El número de subescalas determina el valor de  $\delta_j$  y fue elegido como se dijo de manera de incluir los períodos relevantes.

El número de escalas se escogió para obtener mejor resolución temporal, de acuerdo a:

$$J = \delta_j^{-1} \log_2(N\Delta t/S_0) \quad (3)$$

donde  $N$  es el número de datos y  $\Delta t$  es 1 día.

El parámetro de frecuencia adimensional  $\omega_0$  se elige para representar mejor el paquete de ondas (valores bajos) o ver mas componentes de Fourier en el espectro (valores altos). En el presente análisis se ha elegido  $\omega_0 = 6$ .

Sobre las dos bases de datos se calculó el espectro wavelet global de acuerdo con:

$$\bar{W}^2(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |W_n(s)|^2 \quad (4)$$

donde la función  $W(s)$  está dada por la convolución de la compleja conjugada de  $\Psi$  con la serie de datos  $X_k$ . Este espectro de potencias en el espacio de frecuencias (escalas  $S$ ) es el equivalente wavelet del espectro de Fourier. La ventaja de emplear transformadas wavelets reside en ajustar la resolución a nuestra conveniencia en frecuencias o en tiempo. En el caso límite en que  $\omega_0$  tienda a infinito, los dos espectros coinciden.

Los espectros obtenidos han sido normalizados con las constantes adecuadas para flares y áreas, y tomando en cuenta el número de días considerados en cada ciclo, de modo de poder comparar los espectros respectivos en los ciclos 22 y 23. El análisis se ha hecho en el entorno del máximo de cada ciclo. Para el ciclo 22 los datos disponibles cubren el lapso 19/04/91 – 31/12/92 y para el ciclo 23 el lapso 01/01/98 – 26/5/00.

Para estudiar las áreas alrededor del máximo del ciclo 23 se consideraron tres años desde 01/01/99 al 31/12/01. El espectro obtenido ha sido normalizado con el mismo criterio citado arriba.

En todos los espectros se ha removido la rotación de Carrington mediante un programa de promedio móvil, de modo que los picos obtenidos no se deban a la rotación solar o sus armónicos.

Finalmente, para calcular el campo magnético promedio en los ciclos 21, 22 y 23 se han tomado tres años alrededor del máximo respectivo, es decir los lapsos:

01/01/79 – 31/12/81 (ciclo 21); 01/01/90 – 31/12/92 (ciclo 22) y 01/01/99 – 31/12/01 (ciclo 23).

## III. RESULTADOS

En la figura 2 se observa los espectros obtenidos en la proximidad del máximo del ciclo 22. Se observa una notable similitud entre los espectros correspondientes a las áreas y las fulguraciones. La periodicidad de 162.7 es marginal y está por debajo del nivel de significación si se sustrae el nivel de fondo del espectro. Sin embargo, se encuentran dos picos a los 325.5 días y 490.5 días, respectivamente, que se corresponden exactamente con el 2º y el 3º armónico de la periodicidad de 162.7 días.

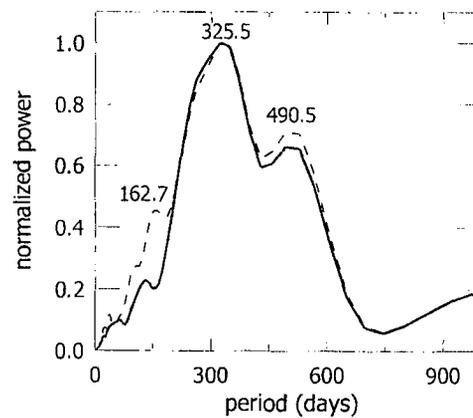


Figura 2: Espectro de áreas (línea de trazos) y fulguraciones (línea gruesa) para el período 91-92 (máximo del ciclo 22).

En la figura 3 se observan los espectros de áreas y fulguraciones cerca del máximo del ciclo 23. Se observa que los espectros no indican la existencia de las mismas periodicidades. En las áreas aparece un pico en 151.9 días, dentro del rango observado para la periodicidad cercana a los 160 días, que presenta una potencia mayor en un factor 3 al pico marginal de 162.7 días del ciclo 22. Este aumento de potencia es consistente con la reaparición de la periodicidad en el ciclo 23 en el flujo magnético analizado por Ballester et al.<sup>(16)</sup>. Nuevamente se observa el segundo armónico, aunque con una potencia mucho menor durante el ciclo 22. Este hecho indica que el fenómeno que produce la periodicidad estaría presente en ambos ciclos, pero la energía se habría redistribuido de manera distinta entre los distintos armónicos durante cada uno de los mismos.

En el espectro de fulguraciones, sólo se obtiene un pico cercano a los 120 días de baja potencia, y otro pico de 243 días, posiblemente el 2º armónico del primero.

Del análisis de los ciclos 16 a 21 Ballester et al.<sup>(15)</sup> concluyeron que la intensidad de la periodicidad de 160 días aumenta con la amplitud del ciclo solar. En la figura 4 se representa la intensidad de los últimos cuatro ciclos solares -ciclos 20 al 23-. Dado que el ciclo 22 es mas intenso que el 23 y nuestros

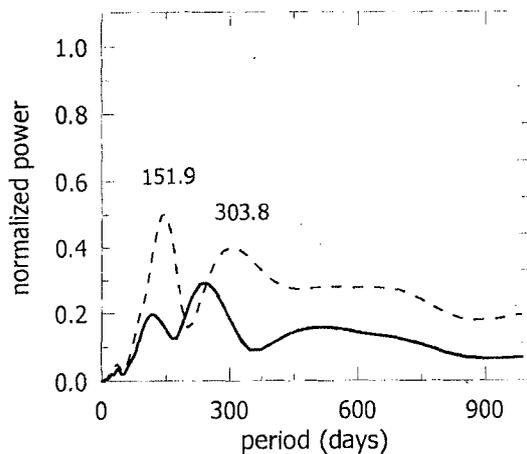


Figura 3: Idem figura 2 para el periodo 1998-2000.

resultados muestran que ocurre lo opuesto para la periodicidad de 160 podemos concluir que la intensidad de la periodicidad de 160 días durante un dado ciclo solar no estaría relacionada con la amplitud del ciclo solar respectivo. Más aún, el ciclo 21 tiene una amplitud similar a la del 22, aunque la periodicidad es mucho mas intensa en el 21, como puede observarse en la figura 6, tomada de Ballester et al <sup>(16)</sup>

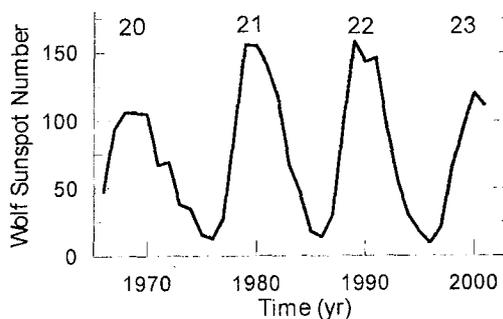


Figura 4. Numero de Manchas solares vs. tiempo. La comparación con las figuras 2, 3 y 6 indica que la intensidad de la periodicidad de 154-160 días no está correlacionada con la intensidad del ciclo solar.

Para ver la evolución de la periodicidad en el ciclo 23, se ha realizado además el espectro de áreas de manchas solares en tres años centrados en el máximo de este ciclo. En la figura 5 puede observarse que el pico aparece ahora en 162.8 días, y se observa otro pico significativo en 652.1 días, que se corresponde con el 4º armónico del primer pico. En comparación con la figura 3, parece que durante el año 2001 que corresponde al comienzo del descenso del ciclo, se excita otro armónico del periodo fundamental, lo que, nuevamente, es consistente con una cascada turbulenta que lleva al intercambio de energía entre los distintos armónicos de un período fundamental.

#### IV. DISCUSIÓN

La figura 6 tomada de Ballester et al <sup>(16)</sup>, corresponde al escalograma (diagrama tiempo - periodo) obtenido mediante análisis wavelet del índice diario MWSI para periodos entre 100 y 200 días. En esta figura la

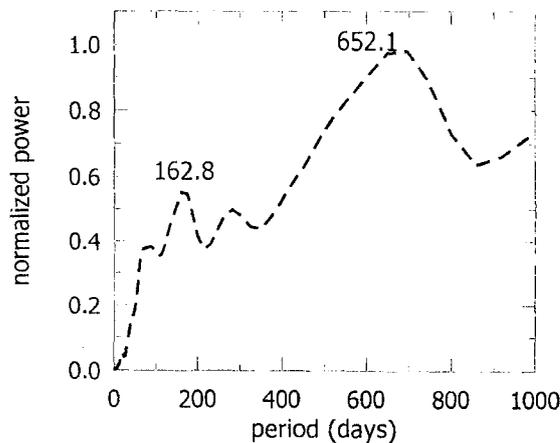


Figura 5: Espectro wavelet de las áreas de manchas solares para el periodo 1999-2001, alrededor del máximo del ciclo 23

periodicidad es intensa en el máximo del ciclo 21, está ausente en el 22 y reaparece marginalmente cerca del máximo del ciclo 23, en el límite de resolución de ese análisis. Nuestros resultados para los lapsos disponibles en el ciclo 22 y 23 son consistentes con los resultados de la figura 6. En nuestro trabajo se ha extendido el ancho de banda para el análisis de periodicidades en el rango buscado y esto ha resultado en el hallazgo de armónicos intensos de la periodicidad cercana a 160 días, en particular en el ciclo 22, para el cual el periodo fundamental está ausente en varios parámetros de la actividad solar. Este hecho plantea una hipótesis a contrastar en otras fulguraciones y otros parámetros de la actividad solar, en los ciclos en los que la periodicidad no aparece. Que los armónicos sean intensos cuando el periodo fundamental cercano a 160 días es débil o está ausente indicaría que la energía de la onda no desaparece. Esta aparición de armónicos es consistente con una cascada de turbulencia fuerte, y en ese caso el periodo de 160 días sería uno entre toda una gama posible de periodos cercanos. De hecho este periodo fundamental que se ha buscado cambia su valor en cada ciclo (y posiblemente dentro del mismo ciclo, como parece indicar la comparación de las figuras 3 y 5) como se desprende de nuestro análisis, y como se puede observar en la figura 6. Esta dispersión de valores es también evidente en los análisis de Oliver et al <sup>(11)</sup>, y Ballester et al <sup>(15)</sup>

Por otra parte vimos que en los distintos parámetros de la actividad solar en los que se ha estudiado la periodicidad de 160 días existe una coincidencia de escalas y localización temporal, lo que indica que esta periodicidad está relacionada con la estructura del campo magnético solar. Nótese que el doble máximo de actividad solar durante el ciclo 22 (figura 4) podría entonces ser la causa del desdoblamiento temporal del escalograma del índice MWSI (figura 6) alrededor del año 1990.

La naturaleza no lineal del dinamo solar permite explicar porque en el periodo comprendido entre los ciclos 16 y 19, la inestabilidad y la actividad solar aumentan ambas <sup>(11)</sup> y por el contrario la periodicidad es más débil en el ciclo 22 que en el 23 a pesar de que el

máximo en el número de manchas en este último ciclo es menor que el correspondiente al ciclo 22, puesto que el aumento de intensidad desde el ciclo 16 a 21 (Oliver et al.<sup>(11)</sup>) y ya desde su inicio durante lo que va del ciclo 23 son sincrónicas a dos eventos caóticos en el dinamo

solar, uno de ascenso (Duhau and Chen<sup>(14)</sup>) y otro de descenso (Duhau<sup>(13)</sup>) respectivamente. Esto indicaría que un cambio brusco de la intensidad del campo magnético medio durante ambos periodos dio origen a la misma inestabilidad.

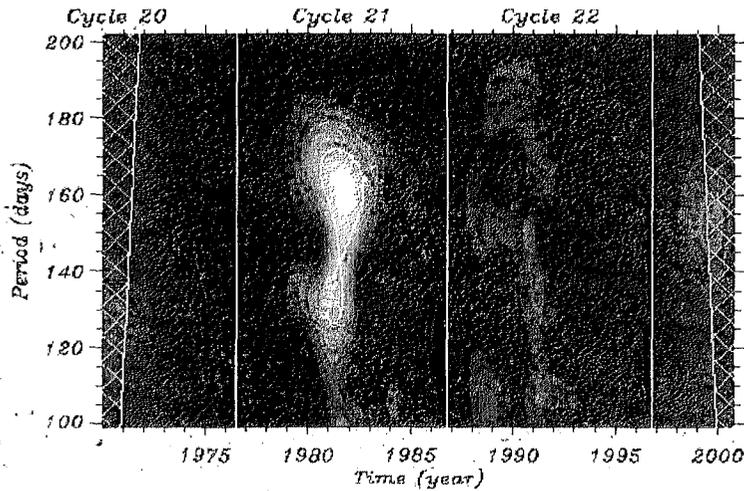


Figura 6. Escalograma periodo-tiempo del índice MWSI para campos magnéticos superiores a los 100 G. Tomado de Ballester et al.<sup>(16)</sup>. Es evidente una periodicidad cercana a los 160 días, durante el máximo del ciclo 21. Esta periodicidad se hace menos significativa durante el ciclo 22, y sólo es reconocible cerca del máximo de este ciclo. Dentro del cono de influencia, durante el ciclo 23, reaparece.

En Ballester et al.<sup>(16)</sup> se vincula la periodicidad a zonas de campo magnético intenso. Por esta razón se analizó la intensidad del campo magnético medido por NSO en Kitt Peak para los ciclos 21, 22 y 23. El resultado se muestra en la figura 7. Para estos datos hemos calculado el valor de campo magnético promedio en tres años centrados en el máximo de cada ciclo. Se ha encontrado un aumento significativo (40 %) en el campo medio para el ciclo 22 (21,4 G) respecto del campo medio en el ciclo 21 (15,2 G) y del ciclo 23 (16,6 G). Este aumento de intensidad es consistente con el evento de descenso caótico a partir de 1993 hallado por Duhau<sup>(13)</sup>. Por otro lado, la aparente anticorrelación entre la aparición del periodo fundamental y el campo promedio cerca de los máximos debería ser estudiada para ver si es sistemática o no, y discutir su conexión con la inestabilidad que da origen a la emergencia de flujo magnético.

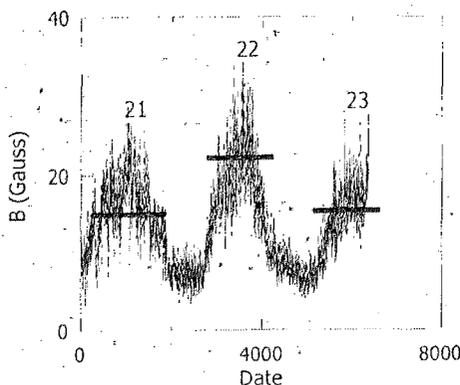


Figura 7. Evolución de la componente transversal del campo magnético solar medida desde Kitt Peak (NSO)

para los ciclos 21, 22 y 23. En línea gruesa se indica el campo promedio alrededor de cada máximo.

Agradecimientos. El presente trabajo contó con el apoyo del CONICET mediante el subsidio Nro. 4490.

## Referencias

1. Rieger E. et al. Nature 312, 623-625
2. Dennis R. B. Sol. Phys. 100, 465-490 (1985)
3. Verma V. K., Joshi G. C., Paliwal D. C. Sol. Phys. 138, 205-208 (1992)
4. Bogart R.S. & Bai T. Astrophys. J. 299, L51-L55 (1985)
5. Lean J. Astrophys. J. 363, 718-727 (1990)
6. Brueckner G.E. & Cook J.W. Astrophys. J. 350, L21-L24 (1990)
7. Bai T. & Cliver E.W. Astrophys. J. 363, 299-309 (1990)
8. Sturrock P.A. & Bai T. Astrophys. J. 397, 337-346 (1992)
9. Bai T. & Sturrock P.A. Astrophys. J. 409, 476-486 (1993)
10. Bai T. Astrophys. J. 404, 805-809 (1993)
11. Oliver R., Ballester J. L. & Baudin F. Nature 394, 552-554 (1998)
12. Duhau S. S. & Martínez E. Geophys. Res. Lett. 22, 3283-3286 (1995)
13. Duhau, S. Sol. Phys. (en prensa) (2002)
14. Duhau S. & Chen C.Y. Geophys. Res. Lett. (en prensa) (2002)
15. Ballester J. L., Oliver R., Baudin F. Astrophys. J. 522, L153-L156 (1999)
16. Ballester J. L., Oliver R., Carbonell M. Astrophys. J. 566, 505-511 (2002)
17. Torrence C.H. & Compo G.P. Bull. Am. Meteor. Soc. 79 (1) 61-78 (1998)