

Observación de la rotación diferencial del sol alrededor del mínimo del ciclo solar 24**Observation of the differential rotation around the minimum of solar cycle 24**José María Gómez^{1,2,*}  & Carlos Daniel González^{1,2} ¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay.²Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay.Autor para correspondencia: jmgomez@pol.una.py.

Resumen: El estudio de las manchas solares es de interés para la predicción de la actividad solar, esto permite la planificación de misiones espaciales, además, la rotación diferencial está conectada a fenómenos magnéticos y de convección, es decir, con el comportamiento del interior del sol. Mediante la utilización del registro de manchas solares del observatorio astronómico Prof. Alexis Troche Boggino de la FP-UNA en el periodo 2005-2010, se ha obtenido la curva de rotación diferencial del sol mediante el método de mínimos cuadrados. Los parámetros de ajuste al modelo de rotación diferencial arrojaron una velocidad de rotación ecuatorial de $A = 14,01 \pm 0,09\%$ /día y un gradiente latitudinal de $B = -0,30 \pm 1,10\%$ /día. Se ha observado una disminución de la velocidad de rotación ecuatorial y del gradiente latitudinal alrededor del mínimo del ciclo solar 24 en relación al comportamiento alrededor del mínimo de los tres ciclos solares precedentes.

Palabras clave: Física Solar; Rotación Diferencial del Sol, Manchas Solares.

Abstract: The study of sunspots is of interest for the prediction of solar activity, allowing the planning of space missions. In addition, the differential rotation is connected to magnetic and convection phenomena, that is, the behavior of the Sun's interior. Through the use of the sunspot record of the astronomical observatory Prof. Alexis Troche Boggino of the FP-UNA in the period 2005-2010, the Sun's differential rotation curve was obtained using the least squares method. The parameters fitting the differential rotation model yielded an equatorial rotation rate of $A = 14,01 \pm 0,09\%$ /day and a latitudinal gradient of $B = -0,30 \pm 1,10\%$ /day. A decrease in the equatorial rotation rate and the latitudinal gradient has been observed around the minimum of solar cycle 24 in relation to the behavior around the minima of the three preceding solar cycles.

Keywords: Solar Physics, Solar Differential Rotation, Sunspots.

Introducción

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar el comportamiento de la rotación solar alrededor del mínimo del ciclo solar 24, ocurrido a finales de noviembre de 2008, de manera a contribuir al entendimiento de dicho fenómeno natural. Se espera observar las características propias de la rotación diferencial y se busca una relación entre estas y los tipos de manchas observadas en el periodo 2005-2010. Se busca observar las características de la rotación diferencial en la fase final del ciclo 23 (2007-2008) y la fase inicial del ciclo 24 (2009-2010).

Los fenómenos físicos que ocurren en el Sol son de importancia debido a su interacción con la Tierra como fuente primordial de energía, las condiciones extremas de su interior funcionan

como un laboratorio natural que permite ajustar los modelos teóricos existentes, mientras que la predicción de la actividad solar es de relevancia para la planificación de las misiones espaciales. El estudio del movimiento de las manchas solares permite comparar modelos y técnicas actuales con aquellos desarrollados y empleados por científicos de épocas pasadas como fue el caso de Husak et al. (2021) en el estudio del método de Boskovic en la determinación de elementos de la rotación solar. Uno de los aspectos de interés es la dependencia de la velocidad de rotación solar con la latitud observada, se ha encontrado que la misma es máxima en el ecuador solar y disminuye en la medida que aumenta la latitud, este fenómeno es denominado la rotación diferencial del Sol (Kambry & Nishikawa, 1990).

Editor responsable: Andrea Weiler de Albertini* **Recibido:** 02/06/2025**Aceptado:** 15/12/2025

*Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Dirección de Investigación, San Lorenzo, Paraguay.



La rotación diferencial del sol fue descubierta en el año 1630 y desde entonces fue estudiada en diversos periodos, estos estudios se hacen fundamentalmente por dos métodos, el método de trazado y el de análisis espectroscópico. Hoy en día se cree que la misma afecta de alguna manera la actividad magnética del sol, sin embargo, esta conexión no es muy clara aún (Li et al., 2013), pero su existencia y análisis juegan un rol importante en el modelo de dinamo del Sol (Charbonneau, 2010).

La rotación diferencial está relacionada al proceso de convección en el interior del sol. Las simulaciones numéricas de alta resolución mostraron ser exitosas en reproducir la rotación diferencial del tipo solar. Campos magnéticos fuertes generados por dínamos en pequeña escala tienen un impacto significativo en la convección térmica. Comparaciones detalladas entre las simulaciones y las observaciones de espectros de energía son necesarias para resolver el problema y para ello son requeridas simulaciones de más alta resolución (Hotta & Kusano, 2021).

Adicionalmente, Tlatov y Tlatova (2024) han estudiado manchas solares y poros entre el 2010 y el 2024, encontrando que la velocidad de rotación es influenciada por la velocidad de rotación de la atmósfera estelar y el movimiento propio de las manchas. También han encontrado que las manchas rotan hasta un 1, 5% más rápido que los poros con un gradiente de rotación también mayor hasta un 47%. Estos autores proponen que la generación de campos magnéticos relacionados a grupos de manchas ocasiona que la mancha líder aumente su velocidad longitudinal mientras que la mancha seguidora disminuya su velocidad.

En el presente trabajo se realiza un estudio de las manchas solares registradas en el Observatorio Astronómico "Prof. Alexis Troche Boggino", de la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción (FP-UNA), durante el periodo 2005 a 2010, que comprenden parte de los ciclos solares 23 y 24 de forma a observar la rotación diferencial del Sol durante el mínimo de ciclo solar 24 y se configura como un trabajo más en el área de interés (Gómez & Doncel, 2019) (Gómez & Benítez,

2022),

Materiales y métodos

Las imágenes fueron obtenidas por proyección mediante una pantalla acoplada al telescopio catadióptrico MEADE de 8 pulgadas de apertura y 2000 mm de distancia focal, en donde las manchas solares fueron registradas manualmente en una hoja con un círculo impreso de 15 cm de diámetro, cada 24 horas aproximadamente.

Debido al tiempo transcurrido entre las observaciones y el inicio del presente trabajo, fue utilizada una tabla solar y una carta heliográfica mediante las cuales fueron comprobadas las coordenadas heliográficas de cada mancha o grupo de manchas previamente asignadas con estas mismas herramientas por profesionales del observatorio. Además, cada grupo de manchas contaba con una asignación con base a la clasificación de McIntosh (1990), lo que contribuyó al análisis posterior de las curvas de ajuste de velocidades obtenidas, los datos de cada mancha fueron analizados y digitalizados.

También se han realizado cálculos por periodos, que son los siguientes: 2005-2010, 2006-2010 y 2007-2010, esto para dar cuenta la diferencias en la cantidad de datos disponibles en cada uno de ellos y en un intento de estudiar de manera simétrica el mínimo del ciclo solar 24 (2007-2010).

Para el estudio de la rotación diferencial del Sol se ha utilizado el seguimiento de las manchas solares ya que la misma es considerada un buen indicador de la actividad magnética del mismo, y en general se puede caracterizar la rotación diferencial del Sol mediante la medición del parámetro Ω dado por:

$$\Omega = A + B \sin^2 \varphi + C \sin^4 \varphi \quad (1)$$

y considerando que la mayoría de las manchas solares se encuentran en latitudes iguales o inferiores a los 40°, se puede obviar el último término de la ecuación (1) y la misma puede expresarse como sigue:

$$\Omega = A + B \sin^2 \varphi \quad (2)$$

Donde A representa la velocidad de rotación ecuatorial, B representa el gradiente de rotación

latitudinal y φ es la latitud heliográfica de la mancha solar de acuerdo a Newton & Nunn (1951) y Wöhl et al. (2010) citados por Jha et al. (2021), el parámetro Ω es la velocidad angular sideral (Kambry & Nishikawa, 1990), es decir, la velocidad angular del Sol teniendo como referencia las estrellas fijas. Sin embargo, mediante las observaciones diarias son obtenidas las velocidades angulares sinódicas definidas por:

$$\Omega_s = \frac{\beta_2 - \beta_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

Siendo β_2 y β_1 las longitudes heliográficas en los tiempos t_2 y t_1 respectivamente. La ecuación anterior puede ser utilizada para determinar la velocidad angular sideral de cada mancha solar por la relación siguiente (Roša et al., 1995):

$$\Omega = \Omega_s + 0,9856 \left(\frac{\cos \psi}{r^2} \right) \cos i \quad (4)$$

Donde i es la inclinación del ecuador solar con la eclíptica, ψ es el ángulo entre el polo de la eclíptica y el eje de rotación solar proyectado en el disco solar y r es la distancia entre el Sol y la Tierra en unidades astronómicas (Lamb, 2017).

Se han descartado las manchas ubicadas en latitudes superiores a 40 grados absolutos como requerimiento del uso de las ecuaciones (1) y (2). Por último, se han repetido los cálculos para ambos hemisferios por separado, de tal manera que contribuyan a ampliar el análisis del fenómeno estudiado.

Los cálculos fueron realizados utilizando un modelo matemático de observación basado en los trabajos de la National Astronomical Observatory en Mitaka (Kambry & Nishikawa, 1990) Tokio-Japón y Kodaikanal Solar Observatory (KoSO) de Kodaikanal-India (Jha et al., 2021).

La velocidad sinódica fue calculada mediante la ecuación (3), en donde las observaciones diferían en un tiempo de 24 horas aproximadamente. La inclinación solar i y el ángulo ψ fueron obtenidos para cada fecha del mapa de latitud solar de la Astronomical Society of Japan, mientras que la

distancia diaria Tierra-Sol r de la In-The-Sky.org de Dominic Ford, Institute of Astronomy, Cambridge UK, disponible en <https://in-the-sky.org/ephemeris.php/3439389>. Con estos datos de velocidad sinódica fue calculada la velocidad angular sideral correspondiente mediante la ecuación (4).

Los valores de velocidad sideral fueron utilizados para determinar por el método de mínimos cuadrados los coeficientes A y B dados en la ecuación (2), con sus respectivas incertidumbres en los periodos comprendidos entre los años 2005-2010, 2006-2010 y 2007-2010 de manera a observar la dependencia de los coeficientes de rotación y sus errores respectivos de la cantidad de datos disponibles.

Finalmente, se obtuvo la gráfica del perfil de rotación junto con la dispersión de puntos de las velocidades siderales promedio para ambos hemisferios en el periodo 2006 - 2010, debido a los

Tabla 1. Distribución de manchas por latitud absoluta.

Latitud heliográfica absoluta (°)	Clasificación McIntosh de manchas solares
0-5	Axx (7), Bxx (5), Csx, Dsi, Dri, Eso (2), Hko, Hro, Hsx (4)
6-10	Axx (5), Bxx (8), Cai, Cao, Cho, Cko, Cri, Cro (10), Cso (7), Crx, Csx, Dko, Dri (3), Eso, Hso (2), Hro (3), Hsx (3)
11-15	Axx (3), Bxx (6), Cro (6), Cso (7), Cao, Dao, Dro, Dso (2), Hro (2), Hso (3), Hsi, Hsx (2), Eso (2)
16-20	Axx (2), Bxx (2), Cro (5), Csi, Cso, Dso (2), Dsi, Eso
21-25	Axx, Bxx (6), Cro (4), Dao, Dro, Hsx
26-30	Bxx, Cro (5), Cso, Dao, Hso, Hsx (2)
31-35	Axx, Bxx, Cro, Hax
36-40	Axx, Dao, Dso (2)
41-50	Bxx, Dai, Dhi, Hax, Hso

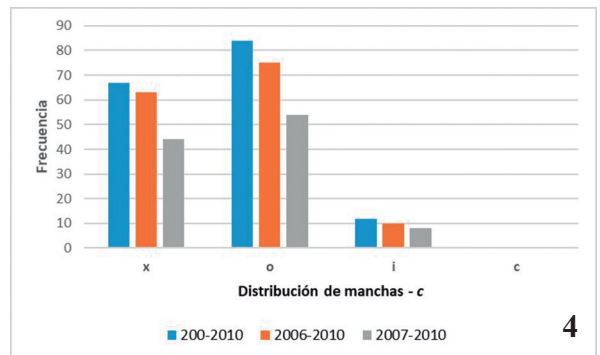
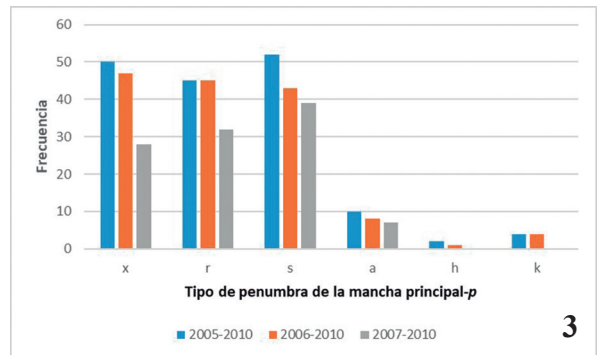
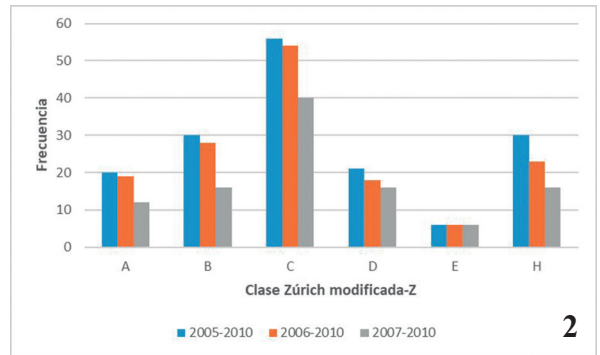
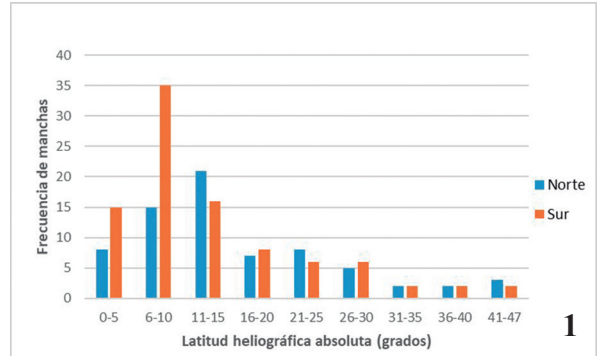
pocos días de observación del año 2005, este último gráfico se comparó con los resultados de Balthazar et al. (1986), además de otros trabajos.

Resultados

Se han encontrado 163 grupos de manchas útiles para el cálculo de velocidades, de los cuales cinco fueron descartados por superar los 40 grados absolutos de latitud. En la Tabla 1 se aprecia la distribución de grupos de manchas por latitud absoluta, se tiene que el 83% se encuentran en latitudes hasta los 25 grados absolutos.

En la Fig. 1 se muestra la distribución latitudinal de manchas por hemisferio para el periodo 2006-2010, notándose que el hemisferio norte tiene un pico en el rango absoluto de 11-15 grados, mientras que el hemisferio sur en el rango absoluto 6-10 grados. En ambos casos se tiene una distribución sesgada hacia bajas latitudes siguiendo una variación similar, esto sería consistente con la ley de Spörer, de aparición de manchas a bajas latitudes al finalizar el ciclo 23 y algunas pertenecientes a latitudes más elevadas correspondiente al ciclo solar 24.

En cuanto a la distribución del tipo de manchas según McIntosh (Clase Zúrich modificada-Z) para los tres periodos, que se observa en la Fig. 2, que un promedio del 70% de ellas corresponde al tipo C o superior, estos grupos están caracterizados por una superficie aproximada de entre 200 y 1200 MSH (Millionths of a Solar Hemisphere) de acuerdo con Carrasco et al. (2015). Además, se ha encontrado que un promedio del 62% de ellas tiene un tipo de penumbra entre rudimentaria y simétrica pequeña, mientras que un promedio de 30% no presenta penumbras, el resto, un 7% en promedio corresponde a los casos de penumbras grandes como de pequeñas asimétricas, y el 1% promedio a grandes asimétricas, esto puede observarse en la Fig. 3. La distribución de manchas en el interior del grupo mostrada en la Fig. 4, indica que un promedio del 93% de los casos correspondió a grupos con ninguna o pocas manchas entre ellas y solamente el 7% promedio a manchas en una cantidad intermedia y sin penumbras.



Figuras 1-4. Distribución de manchas 1) Distribución latitudinal de manchas por hemisferio para el periodo 2006-2010. 2) Distribución del tipo de manchas según McIntosh (Clase Zúrich modificada-Z). 3) Distribución por tipo de mancha principal-p. 4) Distribución de manchas en el interior del grupo.

Tabla 2. Velocidad angular sinódica y velocidad angular sideral. Los ángulos son medidos en ° (grados), los tiempos en días y las velocidades en °/día.

φ (°)	Ω_{sd} (°/día)	$i(B0)$ (°)	$\psi(P)$ (°)	T (día)	Ω_{sn} (°/día)
-5	12,12	-6	-13	0,9907	13,09
-15	14,14	-6	-13	0,9907	15,11
-26	16,86	-6	-15	0,9907	17,82
-25	12,54	-7	-16	0,9907	13,49
5	13,16	-7	-19	0,9907	14,09
1	20,85	-7	-19	0,9907	21,79
-3	10,43	-7	-19	0,9907	11,37
28	17,82	-7	-20	0,9907	18,76
9	11,02	-7	-21	0,9907	11,95
-32	11,42	-7	-22	0,9991	12,32
-45	9,58	-7	-22	0,9991	10,49

Los valores de velocidad longitudinal sinódica obtenidos utilizando la ecuación (3) varían en el rango de 9°/día a 20°/día, siendo las velocidades más frecuentes las encontradas entre los 13°/día y 15°/día. Mediante la ecuación (4) se han transformado estos valores a velocidades siderales observándose un aumento del orden de 1°/día en la velocidad longitudinal como se observa parcial-

mente en la Tabla 2.

Estas velocidades siderales fueron ajustadas por el método de los mínimos cuadrados a la ecuación (2) de lo cual ha resultado una tasa de rotación ecuatorial de $A = 14,01^\circ/\text{día} \pm 0,09^\circ/\text{día}$ y un gradiente latitudinal de rotación $B = -0,30^\circ/\text{día} \pm 1,10^\circ/\text{día}$. Estos coeficientes pueden ser comparados con los obtenidos por otros autores en diferentes periodos de tiempo y ciclos solares en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se observa que el coeficiente de rotación ecuatorial muestra valores cercanos

Tabla 4. Coeficientes de rotación ecuatorial y gradientes latitudinales.

Periodo	A (°/día)	B (°/día)	ΔA (°/día)	ΔB (°/día)	N
2005-2010	14.01	-0.30	0.09	1.10	158
2006-2010	14.09	-0.33	0.09	1.11	148
2006-2010 N	14.53	-1.03	0.16	1.23	59
2006-2010 S	14.37	-0.66	0.11	1.03	89
2007-2010	14.09	-0.50	0.13	1.33	105
2007-2010 N	14.66	-1.32	0.23	1.65	50
2007-2010 S	14.54	-1.14	0.19	1.40	55
2007-2008	15.35	-1.31	0.19	1.46	56
2009-2010	14.04	-1.21	0.19	1.30	49

Tabla 3. Comparación de los valores de A y B con los obtenidos en otros trabajos. Los ángulos son están en ° (grados), los tiempos en días y las velocidades en °/día.

A (°/día)	B (°/día)	ΔA (°/día)	ΔB (°/día)	Autores	Periodo
14,370	-2,65	0,020	0,16	(Kambry & Nishikawa, 1990)	Ciclo solar 19
14,520	-2,53	0,020	0,22	(Kambry & Nishikawa, 1990)	Ciclo solar 20
14,440	-2,22	0,020	0,18	(Kambry & Nishikawa, 1990)	Ciclo solar 21
14,522	-2,84	0,004	0,04	(Gilman & Howard, 1985)	1921 –1982
14,547	-2,96	0,005	0,05	(Howard et al., 1999)	1906 –1987
14,459	-2,99	0,005	0,06	(Howard et al., 1999)	1906 –1987
14,533	-2,77	0,005	0,05	(Javaraiah & Gokhale, 1995)	1984 –1976
14,381	-2,72	0,004	0,04	(Jha et al., 2021)	1923 –2011
14,01	-0,30	0,09	1,10	Este trabajo	2005 –2010

entre sí para los tres periodos establecidos para los cálculos (2005-2010, 2006-2010 y 2007-2010), con sus correspondientes errores bastante próximos para los dos primeros casos y mayor para el tercer periodo, que cuenta con un menor número de puntos de ajuste.

Ocurre algo similar con el coeficiente del gradiente latitudinal de rotación y sus errores respectivos. Los coeficientes de rotación ecuatorial muestra velocidades inferiores a los valores estándares aceptados (aproximadamente 14,50 *grados / día*) en el orden del 3%. Esto guardaría relación con la tendencia de disminución estadísticamente significativa observada en el coeficiente de velocidad de rotación ecuatorial desde el ciclo 12 al ciclo 22 y proyectada para el ciclo solar 24 por Li et al. (2013), si bien esta disminución no sería inferior a $-14,40$ (*grados / día*), debe tenerse en cuenta la relativamente escasa cantidad de datos disponibles en el presente trabajo, en la Fig. 5 se muestran las curvas de ajuste para latitudes positivas para todos los casos estudiados.

Los gradientes de rotación latitudinal muestran valores cercanos a cero, muy distintos de los promedios aproximados de $-2,5$ *grados / día*, siendo el más próximo el correspondiente al periodo 2007-2010. Esto último condice con la falta de apreciación de una tendencia clara de disminución de la velocidad rotacional en las curvas de dispersión, como se muestra en la Fig. 6, correspondiente al periodo 2006-2010.

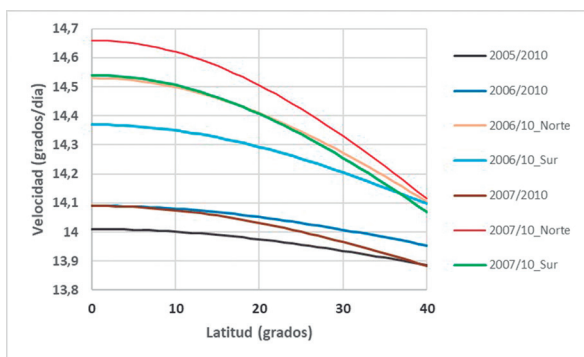


Figura 5. Curvas de ajuste para latitudes positivas.

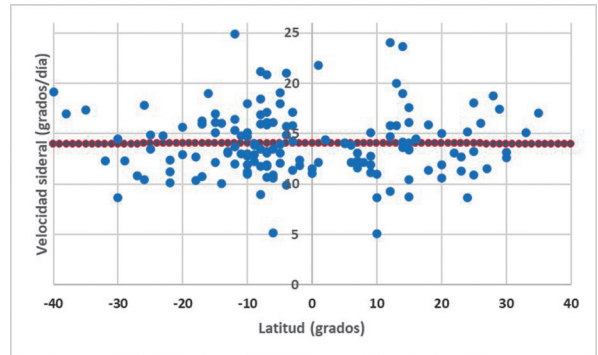


Figura 6: Dispersión de velocidades y curva de ajuste para el periodo 2006-2010.

Discusión

Los coeficientes de ajuste obtenidos por hemisferio, muestran una mayor velocidad de rotación ecuatorial y un mayor gradiente en el hemisferio norte en relación con el hemisferio sur, que también muestran mayores errores, lo que se corresponde con un menor número de datos.

Esta diferencia entre las velocidades de rotación y gradientes entre hemisferios es un fenómeno que ha sido reportado por rangos de latitud en trabajos recientes como el de Abuzeid (2024), en el que se ha estudiado el ciclo solar 20 (1964-1976), habiéndose encontrado una dependencia de la velocidad de rotación del tamaño de las manchas solares. De manera similar, Li et al. (2013) han encontrado que para los ciclos solares 12 al 23, existe una diferencia entre los coeficientes A y B correspondientes a ambos hemisferios solares, en donde el primer coeficiente muestra una tendencia opuesta y estadísticamente insignificante entre los hemisferios norte y sur con el paso de los ciclos.

En cuanto a la etapa final de la fase decreciente del ciclo solar 23 (2007-2008) y la etapa inicial del ciclo solar 24 (2009-2010), se han obtenidos coeficientes marcadamente diferentes que muestran una etapa final con mayor velocidad ecuatorial en relación al inicio del ciclo solar siguiente. Esto último guardaría relación con la ley de Spörer, que como se observa en la gráfica de dispersión del periodo 2007-2010 (Fig. 7), en la fase descendente existe una tendencia de aparición de manchas en

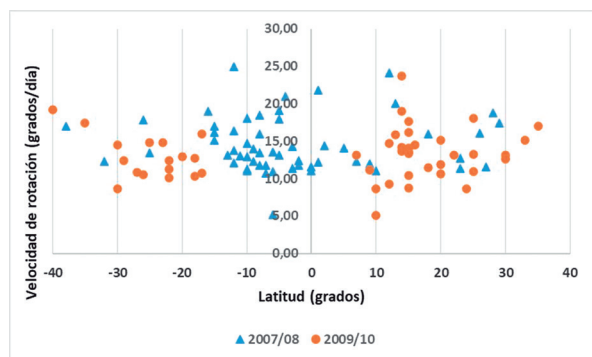


Figura 7. Dispersión de velocidades para hemisferios N-S heliográficos.

latitudes inferiores a 10 grados absolutos, mientras en la parte ascendente se observa un aumento en la tendencia hacia latitudes mayores a los 15 grados absolutos. También puede ser una manifestación temprana, aunque incompleta, por la poca cantidad de puntos, de la dependencia de la rotación diferencial de la intensidad del ciclo en que se encuentra, siendo que un ciclo más intenso se caracteriza por una rotación ecuatorial y un gradiente latitudinal menores en relación a un ciclo de menor intensidad según han concluido Jha et al. (2021) de datos del Kodaikanal Solar Observatory (KoSO) en el periodo 1923-2011.

Sin embargo, en el estudio de Kambry y Nishikagua (1989) se presentan los valores de A y B con sus respectivos errores calculados anualmente para el periodo 1954-1986 con diferentes números de observaciones para cada año y en donde no se observa una relación clara entre la cantidad de estas observaciones y el valor de los coeficientes calculados. En dicho trabajo se obtuvo para el año 1963 unos coeficientes de $A = 14,19 \pm 0,11$ ($^{\circ}/\text{día}$) y $B = -0,13 \pm 1,14$ ($^{\circ}/\text{día}$) para un total de 88 mediciones, siendo estos valores los más próximos a los obtenidos en el presente trabajo.

Abuzeid (2024) ha estudiado la rotación diferencial de manchas solares entre 1964 al 1976 (ciclo solar 20), dividiendo las manchas por superficie o área para su estudio. Ha encontrado que los grupos de manchas más pequeños del hemisferio norte rotan 1,8% más rápido que los grupos de manchas grandes y que esto se invierte en el

hemisferio sur, en donde los grupos de manchas pequeños se mueven 2,5% más lento. Además, el valor de A se aproxima a $14^{\circ}/\text{día}$ (14,08, 14,06, 14,04 y 13,64) para latitudes entre $\pm 25^{\circ}/30^{\circ}$ en correspondencia con lo observado en este trabajo.

De forma a seguir contrastando los resultados obtenidos, hemos comparado los parámetros de ajustes de Javaraiah (2020) en su estudio de los mínimos y máximos de los ciclos 12 al 24, realizado a partir de los datos fotoheliográficos diarios de grupos de manchas solares reportados por el Greenwich Photoheliographic Results (GPR) durante el periodo 1874 – 1976 y por el Debrecen Photoheliographic Data (DPD) durante el periodo 1977 – 2017. Las gráficas de las curvas de ajuste de los ciclos 21 al 24 son comparados con la curva de ajuste obtenida en el presente trabajo para el periodo 2007-2010 en la Fig 8.

Se observa que para los ciclos 21,22 y 23, la velocidad ecuatorial es del orden de los $14^{\circ}/\text{día}$, mientras que el gradiente de rotación es notoriamente mayor para el ciclo 22, superando al correspondiente al ciclo 21. Luego el ciclo 23 tiene un gradiente de rotación latitudinal inferior al de sus dos ciclos predecesores, es interesante notar que en todos estos casos la cantidad de puntos observados supera los $N = 1200$, en un periodo de 3 años alrededor del mínimo del ciclo indicado en la gráfica. Para el mínimo del ciclo solar 24 se tiene una velocidad ecuatorial inferior a todos los casos anteriores de $14,38^{\circ}/\text{día}$, mientras que lo obtenido en el presente trabajo en el periodo 2007-2010 es de $14,05^{\circ}/\text{día}$, el menor de todos los casos con 105 puntos válidos.

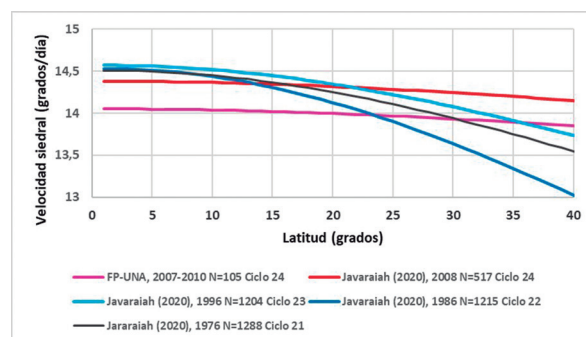


Figura 8. Curvas de ajuste para los ciclos solares 21,22,23 y 24.

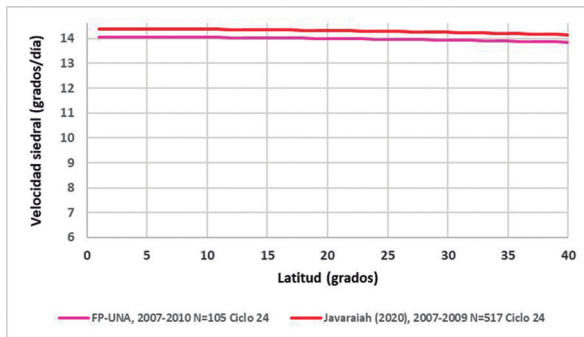


Figura 9. Curvas de ajuste para el ciclo solar 24.

Esta menor velocidad guardaría relación con la distribución de tipos de manchas observada, que en un alto porcentaje son grupos grandes (70%), que, según lo mencionado previamente, podrían presentar velocidades menores a la de grupos pequeños. Note que la cantidad de puntos observados, si bien sigue la misma tendencia de disminución en el mínimo del ciclo solar 24, es muy inferior que la utilizada por Javaraiah (2020) (N=517) y esto pudo haber contribuido a incrementar la tendencia de la curva de ajuste. También debe notarse que los datos de dicho estudio corresponden a registros fotoheliográficos, mientras que los utilizados en el presente trabajo han sido tomados mediante la técnica tradicional de proyección y registro manual.

Para mayor detalle y valoración, en la Fig. 9 se muestra la tendencia seguida por ambos ajustes correspondiente al mínimo del ciclo solar 24, en ambos casos se tiene una rotación diferencial pequeña con gradientes calculados de $B = 0,58$ y $B = 0,50$ (FP-UNA). Para estos ajustes se ha encontrado un error de sesgo medio de $-0,31^\circ/\text{día}$ y un error porcentual medio $-0,02$, lo que implica un error porcentual absoluto del orden del 2%.

Se recomienda para futuros estudios similares implementar modernas técnicas de seguimiento que abarquen la automatización, digitalización y el desarrollo de algoritmos propios de identificación de fenómenos en la fotosfera solar.

Conclusión

Se han calculado las velocidades siderales de rotación de las manchas solares registradas en el

periodo 2005-2010, para luego ajustar estos valores a un modelo clásico de rotación diferencial que permitieron obtener una tasa de rotación ecuatorial de $A = 14,01 \pm 0,09$ ($^\circ/\text{día}$) y un gradiente latitudinal de $B = -0,30 \pm 1,10$ ($^\circ/\text{día}$). Estos valores son inferiores a los valores de referencia típicos debido a que el mínimo del ciclo solar 24 presentó una velocidad de rotación sideral inferior a los mínimos de los tres ciclos solares precedentes con un gradiente de rotación también inferior. El error absoluto de la curva de ajuste obtenida en el periodo 2007-2010 alrededor del mínimo del ciclo solar 24 es del orden del 2% en relación con estudios realizados en el periodo 2007-2009.

Agradecimientos

A la Agencia de Cooperación Internacional de Japón-JICA (Del Inglés Japan International Cooperation Agency) en la persona de Takashi Momiyama, por su colaboración en la enseñanza de las técnicas de observación de manchas solares. A Fredy Doncel Invernizzi, por su colaboración en la obtención de los datos utilizados en el presente trabajo. A Marcos Barrios por la revisión bibliográfica y cálculos.

Financiamiento

Facultad Politécnica FP-UNA.

Contribución de autores

Los autores tuvieron las siguientes responsabilidades al preparar este artículo: José Gómez: dirección general, toma de datos, cálculos, redacción y edición; Carlos González: redacción y revisión.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Literatura citada

Abuzeid, B. (2024). Differential rotation of sunspot groups as a function of their area. *Al-Satit*, 18(39): 12 pp. <<https://journals.misuratau.edu.ly/satit/en/upload/file/R-2827-Differential%20rotation%20of%20sunspot%20groups%20as%20A%20function%20of%20their%20area.pdf>>.

- Balthazar, H., Vazquez, M. & Wöhl, H. (1986). Differential rotation of sunspot groups in the period from 1874 through 1976 and changes of the rotation velocity within the solar cycle. *Astronomy and Astrophysics*, 155: 87–98.
- Carrasco, V.M.S., Lefèvre, L., Vaquero, J.M. & Gallego, M.C. (2015). Equivalence relations between the Cortie and Zürich sunspot group morphological classifications. *Solar Physics*, 290(5): 1445–1455. <<https://doi.org/10.1007/s11207-015-0679-y>>.
- Charbonneau, P. (2010). Dynamo models of the solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7(3): 91 pp. <<https://doi.org/10.12942/lrsp-2010-3>>.
- Gilman, P.A. & Howard, R. (1985). Rotation rates of leader and follower sunspots. *The Astrophysical Journal*, 295: 233–240. <<https://doi.org/10.1086/163368>>.
- Gómez, J.M. & Doncel, F. (2019). Complete prediction of the solar cycle 24 through the combined method. *Reportes científicos de la FACEN*, 10(1): 3–9. <<https://doi.org/10.18004/rcfacen.2019.10.1.3>>.
- Gomez, J.M. & Benitez, D. (2022). Predicción del ciclo solar 25 por el método combinado. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4): 361–373.
- Hotta, H. & Kusano, K. (2021). Solar differential rotation reproduced with high-resolution simulation. *Nature Astronomy*, 5(11): 1100–1102. <<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01459-0>>.
- Howard, R., Gupta, S. & Sivaraman, K. (1999). Measurement of Kodaikanal white-light images II. Rotation comparison and merging with Mount Wilson data. *Solar Physics*, 186(1/2): 25–41. <<https://doi.org/10.1023/a:1005153925209>>.
- Husak, M., Brajša, R. & Špoljarić, D. (2021). On the determination of the solar rotation elements i , Ω and period using sunspot observations by Ruđer Bošković in 1777. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 36(3): 77–98. <<https://doi.org/10.17794/rgn.2021.3.6>>.
- Javaraiah, J. & Gokhale, M.H. (1995). Periodicities in the solar differential rotation, surface magnetic field and planetary configurations. *Solar Physics*, 158(1): 173–195. <<https://doi.org/10.1007/bf00680841>>.
- Javaraiah, J. (2020). Long-term variations in solar differential rotation and sunspot activity, II: Differential rotation around the maxima and minima of solar cycles. *Solar Physics*, 295(170): 16. <<https://doi.org/10.1007/s11207-020-01740-x>>.
- Jha, B.K., Priyadarshi, A., Mandal, S., Chatterjee, S. & Banerjee, D. (2021). Measurements of solar differential rotation using the century long Kodaikanal sunspot data. *Solar Physics*, 296(25): 14 pp. <<https://doi.org/10.1007/s11207-021-01767-8>>.
- Kambry, M.A. & Nishikawa, J. (1990). Solar differential rotation derived from sunspot observations. *Solar Physics*, 126: 89–100. <<https://doi.org/10.1007/bf00158300>>.
- Lamb, D.A. (2017). Measurements of solar differential rotation and meridional circulation from tracking of photospheric magnetic features. *The Astrophysical Journal*, 836(1)10: 11 pp. <<https://doi.org/10.3847/1538-4357/836/1/10>>.
- Li, K.J., Feng, W., Shi, X.J., Xie, J.L., Gao, P.X. & Liang, H.F. (2013). Long-term variations of solar differential rotation and sunspot activity: Revisited. *Solar Physics*, 289(3): 759–768. <<https://doi.org/10.1007/s11207-013-0369-6>>.
- McIntosh, P.S. (1990). The classification of sunspot groups. *Solar Physics*, 125: 251–267. <<https://doi.org/10.1007/bf00158405>>.
- Newton, H.W. & Nunn, M.L. (1951). The Sun's rotation derived from sunspots 1934–1944 and additional results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 111(4): 413–421. <<https://doi.org/10.1093/mnras/111.4.413>>.
- Roša, D., Brajša, R., Vršnak, B. & Wöhl, H. (1995). The relation between the synodic and sidereal rotation period of the Sun. *Solar Physics*,

- 159(2): 393–398. <<https://doi.org/10.1007/bf00686540>>.
- Tlatov, A.G. & Tlatova, K.A. (2024). Differential rotation of individual sunspots and pores. *The Astrophysical Journal*, 977(110): 8 pp. <<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad90a0>>.
- Wöhl, H., Brajša, R., Hanslmeier, A. & Gissot, S.F. (2010). A precise measurement of the solar differential rotation by tracing small bright coronal structures in SOHO-EIT images. *Astronomy and Astrophysics*, 520(A29) 11 pp. <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913081>>.