

## **ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PREDICTIVA DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL APLICADA AL NÚMERO DE MANCHAS SOLARES EN EL PERIODO 1997-2008 (CICLO SOLAR 23)**

**Miguel Parodi<sup>1,2</sup>, Eduardo Luccini<sup>1,2</sup>, Rubén Piacentini<sup>1,3</sup>, Sebastián Grieco<sup>2</sup>, Javier Fornari<sup>2</sup> y Luis Herrera<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Grupo de Energía Solar, Instituto de Física de Rosario (CONICET-UNRosario). Bv. 27 de Febrero 210bis, CP 2000, Rosario, Argentina. e-mail: parodi@ifir-conicet.gov.ar, luccini@ifir-conicet.gov.ar

<sup>2</sup> Facultad de Química e Ingeniería "Fray Roger Bacon", Pontificia Universidad Católica Argentina. Mendoza 4197, CP 2000, Rosario, Argentina.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNRosario). Pellegrini 250, Rosario, Argentina.

**RESUMEN:** Se presenta el análisis comparativo entre los promedios anuales del número de manchas solares observado durante el ciclo 23 (periodo 1997-2008) y las predicciones realizadas previamente mediante dos métodos: Redes Neuronales Artificiales (RNA) y McNish-Lincoln modificado (NOAA). La predicción NOAA fue mas acertada en general en valor absoluto durante el ciclo, con una diferencia porcentual media de sólo  $-2\% \pm 14\%$  ( $2\sigma$ ) en el periodo 1997-2006, pero las RNA representaron el ciclo muy bien de modo cualitativo e incluso la RNA que predijo a partir de 1999 mostró la mejor estimación del final del ciclo, prediciendo un promedio de 9.6 manchas en 2007 sobre un valor observado de 7.5 en ese año previo al mínimo, cuando todas las predicciones padecen una marcada degradación.

**Palabras clave:** ciclo solar, manchas solares, redes neuronales, predicción.

### **INTRODUCCION**

La actividad solar domina el cúmulo de emisiones provenientes del espacio que arriban a nuestro planeta, es la fuente de energía que le da vida y su influencia abarca desde su estrecha relación con el clima del planeta hasta los efectos sobre los sistemas satelitales y espaciales desarrollados por el hombre. Por ello es fundamental caracterizar su comportamiento, y en lo posible anticipar su evolución futura. La actividad solar presenta diversos niveles de variabilidad, asociados a características dinámico-físicas de la estructura y funcionamiento del sol. Dicha variabilidad se expresa a través de parámetros cuyos cambios pueden ser de tipo periódico, como la emisión radiativa, u ocasional, como las fulguraciones solares. Entre las evidencias de fenómenos cíclicos, las manchas solares son protuberancias en su superficie asociadas a los extremos de campos magnéticos locales muy intensos, cuyo origen es el ciclo de rotación magnética del núcleo del sol con un periodo de 22 años. De tal modo, las manchas solares presentan una periodicidad de aproximadamente 11 años como respuesta a cada semi-ciclo de rotación magnética. Los máximos de actividad solar se evidencian en un elevado número de manchas solares.

En 1848, Johann Rudolf Wolf diseñó un método para cuantificar diariamente las observaciones del número de manchas solares, aunque con distinto grado de rigurosidad se guarda un registro del promedio anual del número manchas solares desde el año 1749 completando hasta el presente un total de 23 ciclos. El número relativo diario de manchas solares, número de Wolf, o más recientemente denominado International Sunspot Number se define como  $R = K(10g + s)$ , donde  $g$  es el número de grupos de manchas,  $s$  es el número total de manchas distinguibles y  $K$  es un factor de homologación específico de cada telescopio empleado en la observación. La figura 1 muestra la serie completa de promedios mensuales de  $R$  hasta el presente, incluyendo el ciclo 23 que se analiza en el presente trabajo.

En tanto se van incorporando años de observaciones y la serie temporal se va ampliando, la predicción de  $R$  es tema de creciente interés y se multiplican los métodos que procuran adelantar su comportamiento. Uno de los métodos de regresión más difundidos y clásicos es el de McNish-Lincoln (1949), luego modificado por Stewart-Ostrow (1970). En tanto, las redes neuronales artificiales (RNA) son métodos computacionales no lineales cuyo uso ha cobrado fuerte impulso en las últimas décadas debido al desarrollo de nuevos algoritmos prácticos y a los avances tecnológicos en informática.

Junto con la presentación de un algoritmo nuevo basado en el análisis del punto de inflexión en la fase creciente para predecir el máximo de manchas solares, el trabajo de Verdes et al (2000) realizó la predicción genuina del ciclo 23 completo a partir del año 1999 mediante RNA y su comparación con el método de McNish-Lincoln modificado (en adelante predicción NOAA), incluyendo también una prueba de predicción genuina por RNA desde el año 1997. Se ha establecido que el ciclo solar 23 ha finalizado con el mínimo del mes de Diciembre de 2008 (Nature, 2009). De tal modo, estamos en condiciones de evaluar actualmente el comportamiento predictivo de cada algoritmo durante el ciclo 23 completo. En este trabajo hacemos un análisis comparativo de las predicciones durante el ciclo 23 con los dos métodos mencionados: RNA y McNish-Lincoln modificado.

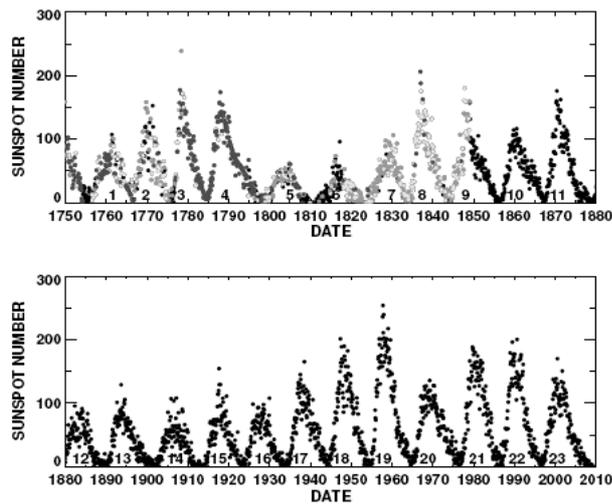


Figura 1. Serie temporal completa de observaciones del promedio mensual del número de manchas solares en el periodo 1749-2009. Los diferentes tonos previos a 1850 indican etapas en que la serie fue reconstruida a partir de distintos métodos (Hathaway, 2010).

## REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las redes neuronales artificiales (RNA) son estructuras computacionales de procesadores simples llamados *neuronas*, conectados entre sí a través de canales de información cuya importancia está definida por un *peso*, que debe determinarse durante un proceso de *aprendizaje* para lograr relacionar apropiadamente los estímulos externos de entrada con la salida deseada. En este trabajo se utiliza la arquitectura llamada *feed-forward*, donde las neuronas están agrupadas en *capas*, la primera de las cuales (capa de entrada) es alimentada por los estímulos externos constituidos por el vector columna **I** (Figura 2). Las unidades de entrada envían estos estímulos a las neuronas de las capas intermedias, cuyas unidades (*ocultas*) procesan la información que reciben y comunican los resultados hacia la capa última, la capa de salida. Las neuronas de la capa de salida producen la respuesta final **O** a los estímulos externos. En este proceso de aprendizaje o *entrenamiento*, los pesos se ajustan de acuerdo al algoritmo conocido como *regla de retropropagación* (Rumelhart et al., 1986).

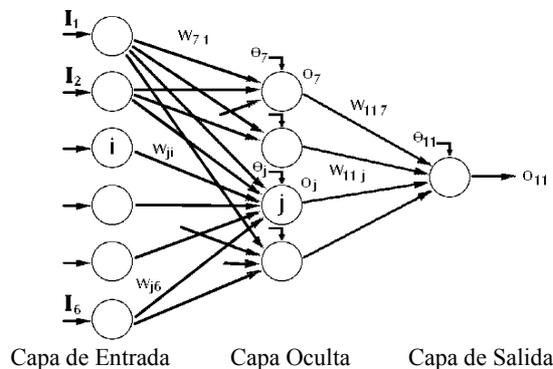


Figura 2. Ejemplo de una red neuronal artificial con estructura 6:4:1.

Este método modifica los pesos que van desde la capa de salida hacia la capa de entrada, reduciendo el error entre la salida deseada definida por el vector *target* **T** y la salida real obtenida por la RNA, **O**.

Como arquitectura de la RNA se eligió la configuración 12:3:1 optimizada en un análisis previo, donde se realizó un trabajo exhaustivo bajo el marco de la Teoría de la Dinámica de Sistemas (Calvo et al., 1995). Respecto al intervalo de entrenamiento, el presente trabajo incorpora los últimos siete años (1992-98) y mantiene el mismo intervalo de *cross-validation* (el ciclo 21: 1976-1986) a fin de permitir una comparación directa entre ambos trabajos.

## METODO NOAA

La predicción NOAA emplea el clásico método de McNish-Lincoln (1949), diseñado inicialmente para predicciones de promedios anuales, modificado luego por Stewart-Ostrow (1970) extendiéndolo a predicción de valores mensuales. Es un algoritmo autoregresivo basado en la periodicidad de la serie temporal, asumiendo que la misma es estacionaria una vez que se ha removido la tendencia. El proceso de predicción de McNish-Lincoln consiste en 4 pasos: - definir el punto de partida de todos los ciclos, por ejemplo los mínimos anuales, - promediarlos para obtener el *ciclo medio*, - restar de cada ciclo ese ciclo medio, dejando así los “residuos” de cada ciclo, y - predecir un punto anual dado de un ciclo como el valor del ciclo medio en ese punto más una corrección que es combinación lineal de los residuos de los puntos precedentes. La mejora de Stewart-Ostrow consistió en extender el método de McNish-Lincoln a predicciones mensuales, minimizando el efecto de

fluctuaciones de corto plazo en los promedios mensuales mediante promedios de ventana deslizante de 13 meses, lo cual requiere una extrapolación adicional de 6 meses para la predicción.

## RESULTADOS

El trabajo de predicción (Verdes et al., 2000) empleado como referencia en el presente análisis se realizó en el año 1999. La figura 3-superior muestra los promedios anuales del número de manchas solares observados durante el ciclo 23, junto con las predicciones realizadas por la NOAA (método McNish-Lincoln modificado) y por las RNA a partir del año 1997 (tomando 1996 como último punto observado) y a partir del año 1999 (tomando hasta el último punto observado, de 1998). La figura 3-inferior presenta las diferencias porcentuales de las predicciones NOAA, RNA 1997 y RNA 1999 respecto de las observaciones. La predicción NOAA logra una precisión notable durante prácticamente todo el ciclo, con una diferencia porcentual media de sólo  $-2\% \pm 14\%$  ( $2\sigma$ ) en el periodo 1997-2006. En tanto, las RNA muestran una predicción cualitativamente acertada aunque con una sobreestimación sistemática de los valores observados (máximo: 135 sobre 120 observadas), en particular la RNA lanzada en 1997 que se comporta como una *envolvente* de los valores observados. La sobreestimación del máximo también se observa en las predicciones de Conway et al. (1998) con distintas arquitecturas de redes (máximo: 130). Esto se puede deber al aprendizaje por las RNA de la tendencia general al incremento de los máximos en los ciclos posteriores a 1850, modulado por fenómenos de mayor plazo como el ciclo de Gleissberg de aproximadamente 80 años (Hathaway et al., 1999). Sin embargo, la RNA lanzada en el año 1999, con dos años más de valores iniciales reales (1997 y 1998), logra un importante acercamiento a los promedios observados en la etapa descendente del ciclo, y en particular es el más acertado en el año 2007 cuando la degradación de las predicciones comienza a hacerse mas evidente. La falta de precisión hacia los últimos años del ciclo se debe a dos factores: la previsible degradación en la precisión de las predicciones y la inusual extensión de la etapa descendente del ciclo 23 con valores que cayeron suavemente hasta uno de los mínimos mas bajos registrados y con una recuperación muy lenta (promedios anuales de 2.9 en 2008 y 3.1 en 2009). La extensión total del ciclo 23 se estima en 12.6 años, contra 11 años de promedio histórico.

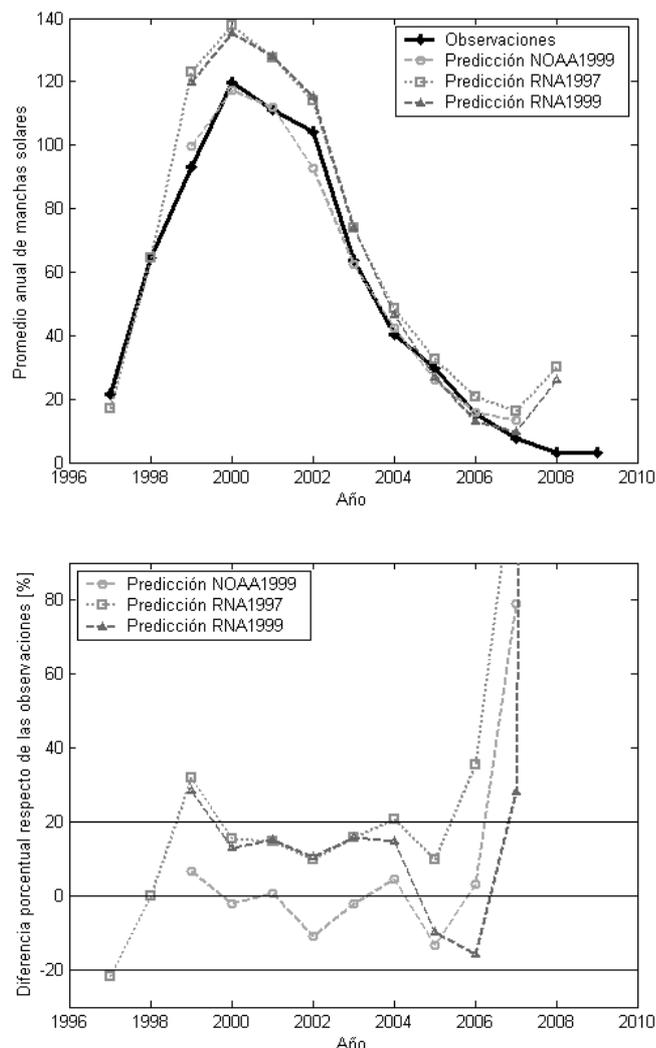


Figura 3. Superior: Promedio anual del número de manchas solares observadas durante el periodo 1997-2009, junto con las predicciones genuinas correspondientes a redes neuronales artificiales iniciadas en 1997 y 1999, y al método de McNish-Lincoln modificado, desde el año 1999. Inferior: Diferencia porcentual entre las distintas predicciones y las observaciones.

La figura 4 muestra el promedio normalizado de observaciones de los ciclos 1 a 22, junto con el ciclo 23 observado partiendo del mínimo. Se puede notar que, excepto por una extensión de la etapa ascendente de 4.5 años (contra 4 años del ciclo medio) y una extensión aun mayor de la etapa descendente dando un total de 12.6 años contra 11 del ciclo medio, el ciclo 23 se puede considerar cualitativamente un ciclo *típico*, razón por la cual métodos basados en el ciclo medio como McNish-Lincoln modificado y el método analítico de Hathaway reproducen a valor absoluto (aunque no cualitativo) con aceptable precisión las observaciones del ciclo 23.

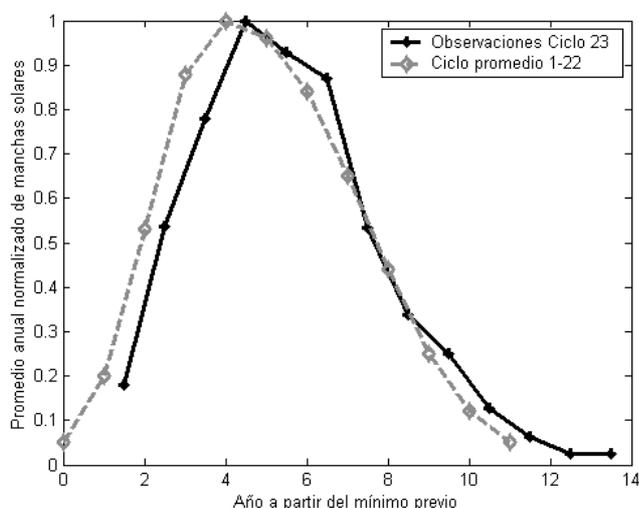


Figura 4. Gráfico normalizado de los promedios anuales del número de manchas solares observadas durante el ciclo solar 23, en comparación con el ciclo medio correspondiente al promedio de los ciclos 1 al 22. Ambas gráficas comienzan en la posición del mínimo. El máximo del promedio ocurre a 4 años del mínimo, mientras que el máximo del ciclo 23 ocurrió 4.5 años luego del mínimo.

## CONCLUSIONES

Con 12.6 años de extensión (Nature, 2009), el ciclo 23 es el más largo desde 1850. La longitud en este lapso ha variado entre 10 años (ciclo 16) y 12 años (ciclo 14), con valor medio 11 años, muy aproximadamente (Conway, 1998). Tanto el ciclo medio en el predictor de McNish-Lincoln como las redes neuronales artificiales entrenadas para la predicción del Ciclo 23 se computan sobre este periodo. A los fines prácticos, el ciclo medio resulta de 11 años de extensión. En cambio, la mejor RNA entrenada hasta 1998 logra un mejor ajuste porcentual a medida que el ciclo se aproxima al mínimo en 2008 (figura 3-inferior).

A simple vista puede apreciarse que cualitativamente la mejor RNA predice un comportamiento similar a la curva de los datos medidos, con más detalle que el predictor de NOAA (figura 3-superior). Además del mejor ajuste en la zona del mínimo, también reproduce el punto de inflexión en el año 2002, en tanto el ciclo medio lo hace un año después. Esto podría deberse a una afortunada pero estocástica propiedad de la mejor red entrenada hasta 1998. Sin embargo, la mayoría de las redes bien entrenadas hasta ese año y aún las entrenadas hasta 1996 muestran la misma capacidad para reproducir la posición del máximo (en 2000) y el punto donde la derivada segunda se anula, dos años después.

El ciclo predicho numéricamente por los métodos de McNish-Lincoln y el muy conocido ciclo definido analíticamente por el método de Hathaway (e.g. Verdes et al., 2000) no reproducen la forma precisa del ciclo solar. Lo *suavizan*, mostrando siempre la misma forma, extensión y posición del punto de inflexión, un año después que las RNA. Esto es propio de métodos lineales cuya hipótesis presupone que la serie temporal es estacionaria (Conway, 1998). Por el contrario, la flexibilidad del diseño de un algoritmo de autoregresión no lineal, como las RNA en capas, les permite en el caso de esta serie aprender y representar con detalle la función temporal del número anual (suavizado) de manchas solares, a pesar del reducido número de datos.

La presente ha significado una de las primeras experiencias de uso de las RNA como algoritmo predictor del ciclo de manchas solares como índice de la actividad solar, y fue precisamente en una época en que dicho algoritmo comenzó a cobrar auge. Aun se plantean interrogantes con respecto a la elección de otros ciclos de validación y testeo, a la fecha de lanzamiento de las predicciones, etc., que también puntualizan otros autores (e.g. Conway, 1998). En particular, nos preguntamos si la sobreestimación del máximo en este trabajo es a consecuencia de la elección del ciclo 21 para validación, uno de los de mayor amplitud desde 1850.

## REFERENCIAS

- Calvo R.A., Ceccatto H.A. y Piacentini R.D. (1995). Neural network prediction of solar activity. *Astrophys. J.*, 444, 916-921.  
 Conway A.J. (1998). Time series, neural networks and the future of the Sun. *New Astronomy Reviews.* 42, 343-394.  
 Conway A.J., K. P. Macpherson, G. Blacklaw, and J. C. Brown (1998). A neural network prediction of solar cycle 23, *J. Geophys. Res.*, 103(A12), 29,733–29,742, doi:10.1029/98JA02539.

- Hathaway D. H., Wilson, R. M., and Reichmann, E. J. (1999). "A synthesis of solar cycle prediction techniques", *J. Geophys. Res.*, 104, A10, 22375-22388.
- Hathaway D.H. (2010). The Solar Cycle. *Living Rev. Solar Phys.*, 7, 1.
- McNish A.G. y Lincoln J.V. (1949). Prediction of sunspot numbers. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 30, 673-685.
- Nature (2009), Quiet Sun enters new sunspot cycle, *News In Brief*, 459, 152.
- Rumelhart D., Hinton G., y Williams R. (1986). *Parallel distributed processing*, Vol. 1: Foundations. Cambridge, MA: MIT Press.
- Stewart F.G. y Ostrow S.M. (1970). Improved version of the McNish-Lincoln method for prediction of solar activity. *Telecommun. J.*, 37, 228-232.
- Verdes P.F., Parodi M.A., Granitto P.M., Navone H.D., Piacentini R.D. y Ceccatto H.A. (2000). Predictions of the maximum amplitude for Solar Cycle 23 and its subsequent behavior using nonlinear methods, *Solar Physics*, 191, 419-425.

**ABSTRACT:** A comparative analysis is presented between the observed annual mean solar sunspot numbers during the Solar Cycle 23 (period 1997-2008) and predictions using two methods: Artificial Neural Networks (RNA) and McNish-Lincoln modified (NOAA). NOAA prediction was in general more accurate in absolute value during the cycle, with an average percentage difference of only  $-2\% \pm 14\%$  ( $2\sigma$ ) in the period 1997-2006. However, RNA represented qualitatively very well the cycle. In particular, the RNA predicting from 1999 on showed the best estimation over the last years of the cycle, predicting an average of 9.6 sunspots in 2007 against an observed value of 7.5 in this year previous to the minimum, when all predictions suffer generally a marked degradation.

**Keywords:** solar cycle, sunspots, neural networks, prediction.