



Modelado magnético de regiones activas solares: Una comparación entre dos modelos libres de fuerzas

F.A. Nuevo^{1,4}, G. Valori², M. López Fuentes¹, C.H. Mandrini^{1,3} & A.M. Vásquez^{1,5}

¹ *Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina*

² *Mullard Space Science Laboratory, Department of Space & Climate Physics, University College London, Londres, Reino Unido*

³ *Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina.*

⁴ *Ciclo Básico Común, UBA, Argentina.*

⁵ *Departamento de Ciencia y Tecnología, UNTREF, Argentina.*

Contacto / federico@iafe.uba.ar

Resumen / El conocimiento detallado del campo magnético coronal (\mathbf{B}) es fundamental para entender los mecanismos físicos que producen los fenómenos activos en la corona. Sin embargo, no se encuentran disponibles mediciones directas de alta resolución del campo magnético coronal, por lo cual éste se modela a partir de mediciones en la superficie solar (magnetogramas). En las regiones activas (ARs) donde, la presión magnética es mucho mayor a la presión de plasma, el régimen libre de fuerzas ($\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$) es una aproximación adecuada. Si α es uniforme en todo el recinto de cálculo el modelo es llamado libre de fuerza lineal (LFFF), si en cambio α depende de la posición, el modelo es libre de fuerza no lineal (NLFFF). En este trabajo comparamos implementaciones numéricas específicas de un modelo LFFF y otro NLFFF aplicadas a dos ARs.

Abstract / The knowledge of the three-dimensional coronal magnetic field (\mathbf{B}) at high spatial resolution is key to better understand the physical mechanisms that trigger active phenomena in the corona, the main drivers of space weather. High resolution, direct coronal measurements of \mathbf{B} are not available, so we must rely on suitable coronal field models based on the available photospheric field measurements (magnetograms). For active region (AR) magnetic fields, where magnetic pressure is much larger than plasma pressure, the force-free regime ($\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$) is a valid approximation. Force-free field models for which the α parameter is a constant are called Linear (LFFF) and models for which α is a function of the position are called non-linear (NLFFF). In this work we test and compare specific numerical implementations of both LFFF and NLFFF models applied to two ARs.

Keywords / Sun: corona — Sun: magnetic fields

1. Introducción

En las últimas décadas se ha logrado un avance sustancial del conocimiento físico de los fenómenos que ocurren en la atmósfera solar, en particular en la corona, debido al progreso sostenido de esfuerzos observacionales, teóricos y de modelado numérico de la comunidad astrofísica. Sin embargo, existen todavía grandes dificultades en la determinación observacional del campo magnético coronal (\mathbf{B}), responsable tanto del calentamiento de la corona como de los fenómenos eruptivos que ocurren en ella, que son de gran relevancia en la llamada “meteorología del espacio”. Debido a estas dificultades se requiere de modelos que permitan determinar el campo magnético coronal a partir de observaciones en la superficie solar (magnetogramas). En regiones activas (ARs), la hipótesis de un campo libre de fuerzas ($\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$) resulta válida, ya que la presión magnética es varios ordenes de magnitud mayor a la presión del plasma. Las extrapolaciones libre de fuerza lineal (LFFF) son usualmente utilizadas para el modelado de ARs. Sin embargo, existe evidencia observacional de que α varía espacialmente, aún dentro de una misma AR, tanto a nivel fotosférico como coronal, por lo cual un modelo no lineal libre de

fuerzas (NLFFF) resulta una descripción más realista. Para una revisión sobre la validez de los modelos libre de fuerza referimos al lector a Mastrano et al. (2018). En este trabajo comparamos ambos modelos para dos ARs: NOAA 11836 y 11504.

2. Método

2.1. Condición de contorno

Mientras que los modelos LFFF se determinan usando como condición de contorno magnetogramas de la componente del campo a lo largo de la visual (magnetogramas longitudinales), los modelos NLFFF requieren, además, el conocimiento de las componentes transversales del campo (magnetogramas vectoriales). Debido a que las condiciones físicas en la fotosfera no son consistentes con la condición libre de fuerza (que se cumple en la corona) se minimiza la fuerza de Lorentz sobre la caja de cálculo asociada al magnetograma, variando el campo dentro de los rangos de incerteza del mismo. Este procedimiento se denomina preprocesamiento (Wiegmann et al., 2006; Fuhrmann et al., 2007). Para este trabajo utilizamos magnetogramas del instrumento

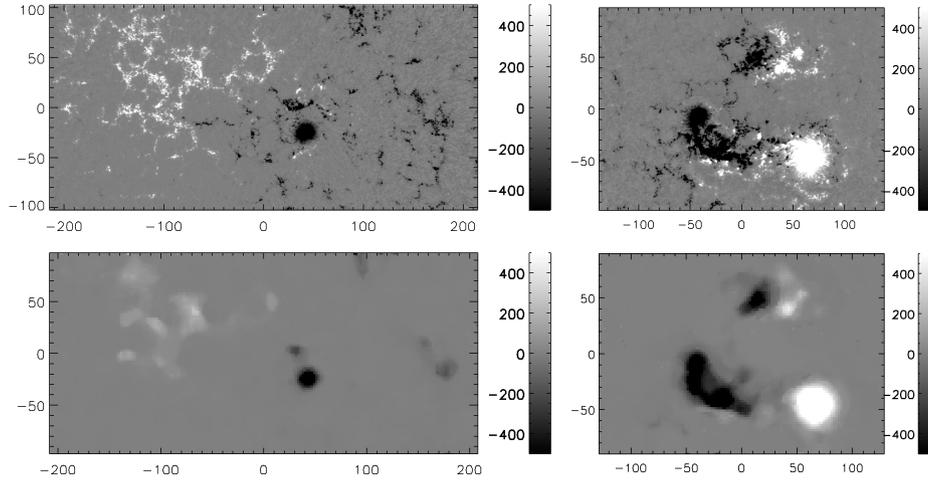


Figura 1: Magnetograma longitudinal original (arriba) y magnetograma preprocesado resultante (abajo) para las ARs 11836 (izquierda) y 11504 (derecha). Las coordenadas están expresadas en Mm y el campo en G.

Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) abordo de la misión *Solar Dynamics Observatory* (SDO) y el método de preprocesamiento de Fuhrmann et al. (2007). Debido a las grandes incertezas en la medición del campo transversal, previo al preprocesado se aplica un *binning* al magnetograma por un factor de 1/6 y se lo suaviza. De esta forma, se mejora la relación señal/ruido y, además, se reduce el tiempo de cálculo. Para el suavizado se utiliza un método de *windowed-media* (Press et al., 2007) que minimiza la diferencia entre los valores de campo y su mediana en una ventana predefinida. La Fig. 1 muestra el magnetograma longitudinal original (arriba) y el magnetograma preprocesado resultante (abajo), que se utilizó como condición de contorno para modelar el campo magnético.

2.2. Modelo NLFFF

Calculamos el modelo NLFFF usando el método magnetofriccional descrito en Valori et al. (2005). Para ello se busca una solución estacionaria del siguiente sistema de ecuaciones usando como condición inicial un campo potencial:

$$\nu \mathbf{u} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + C_L \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}), \quad (3)$$

donde \mathbf{u} es la velocidad, \mathbf{J} es la corriente, ν es una viscosidad numérica y el término $C_L \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B})$ difunde las divergencias numéricas.

2.3. Modelo LFFF

El modelo LFFF es calculado usando el método de transformada rápida de Fourier (FFT) descrito por Alissandrakis (1981). El campo se escribe como:

$$\mathbf{B}(x, y, z) = \sum_{u,v} \hat{\mathbf{B}}(u, v, z) \exp[2\pi i(ux + vy)]. \quad (4)$$

Como el campo decrece con la altura, el factor $\hat{\mathbf{B}}$ puede ser reescrito como:

$$\hat{\mathbf{B}}(u, v, z) = \exp(-kz) \hat{\mathbf{B}}(u, v, 0), \quad (5)$$

donde $k = (4\pi^2 q^2 - \alpha^2)^{1/2}$, con $q^2 = u^2 + v^2$. Finalmente el factor $\hat{\mathbf{B}}(u, v, 0)$ se determina usando la FFT de $B_z(x, y, 0)$ (magnetograma longitudinal).

En el modelo LFFF, α es un parámetro libre. Usualmente se lo estima buscando el valor que logra el mejor acuerdo entre las líneas de campo del modelo y los arcos en las imágenes de la AR en el extremo ultravioleta del espectro. En este trabajo estimamos α usando el valor medio de la distribución coronal de $\alpha = J_z/B_z$, obtenida a partir del modelo NLFFF. Los valores obtenidos para las ARs 11836 y 11504 son $\alpha = 1.3 \times 10^{-2} \text{ Mm}^{-1}$ y $\alpha = 1.9 \times 10^{-2} \text{ Mm}^{-1}$, respectivamente.

3. Resultados y Discusión

Se calcularon ambos modelos para las ARs 11836 y 11504. Para estimar el grado libre de fuerza que alcanza la solución en el caso NLFFF se calculó el parámetro (Wheatland et al., 2000):

$$\sigma_J = \frac{\sum J_i \frac{|\mathbf{J} \times \mathbf{B}|_i}{J_i B_i}}{\sum J_i} = \frac{\sum J_i |\sin \theta_J|_i}{\sum J_i}. \quad (6)$$

Para las dos ARs estudiadas $\sigma_J \approx 0.24$, que representa un ángulo promedio (entre \mathbf{B} y \mathbf{J}) $\theta_J \approx 14^\circ$.

A modo de comparación cualitativa entre ambos modelos, la Fig. 2 muestra las líneas de pequeña (altura < 50 Mm) y gran (altura > 150 Mm) escala, para la AR 11836. La Fig. 3 muestra lo mismo para la AR 11504.

Para la AR 11836 las líneas de campo de pequeña escala del modelo NLFFF muestran un nivel de torsión mayor que las de gran escala, mientras que en el modelo LFFF ambos tipos de líneas tienen el mismo nivel de torsión.

Para una comparación cuantitativa, calculamos la energía y helicidad magnética usando los métodos descritos en Valori et al. (2012) y Valori et al. (2013), respectivamente. La Tabla 1 muestra los valores obtenidos

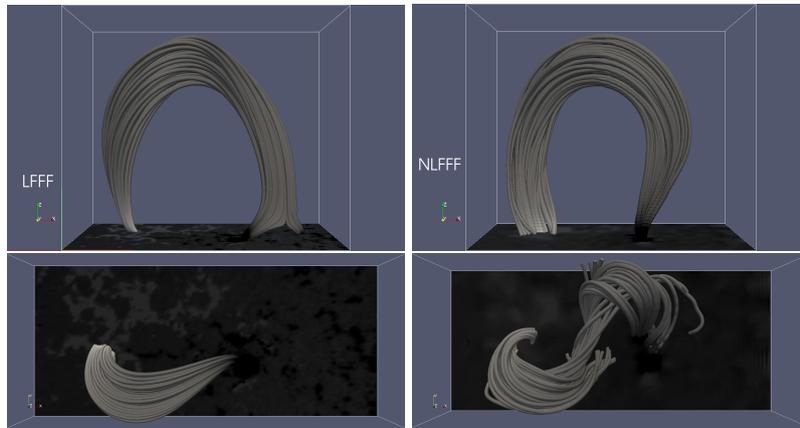


Figura 2: Comparación de las líneas de gran (arriba) y pequeña escala (abajo) para los modelos LFFF (izquierda) y NLFFF (derecha) correspondientes a la AR 11836. Las dimensiones de la caja de cálculo son $\sim 400 \times 200 \times 300 \text{ Mm}^3$.

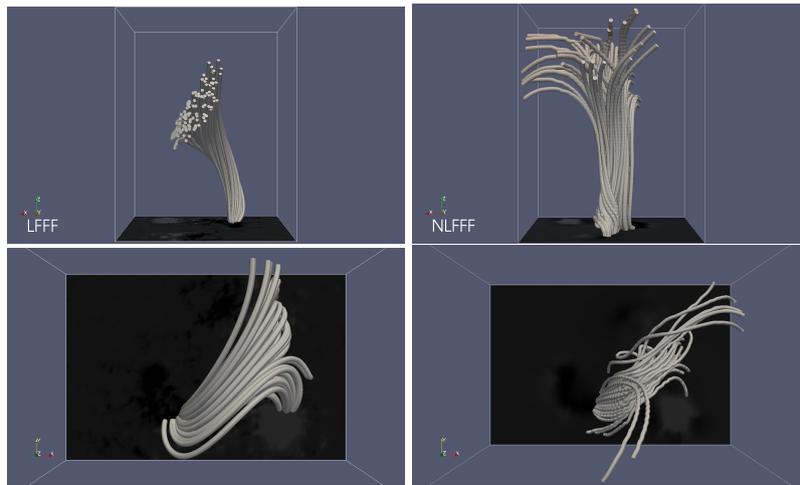


Figura 3: Comparación de las líneas de gran (arriba) y pequeña escala (abajo) para los modelos LFFF (izquierda) y NLFFF (derecha) correspondientes a la AR 11504. Las dimensiones de la caja de cálculo son $\sim 250 \times 180 \times 300 \text{ Mm}^3$.

para las dos ARs estudiadas usando ambos modelos. Mientras que las líneas de campo del modelo LFFF tienen el mismo valor de α , las líneas de campo del modelo NLFFF tienen valores diferentes, mayores para las líneas de pequeña escala y menores para las líneas de gran escala. Como la energía y helicidad magnética son magnitudes integrales dependientes del valor de α , estas cantidades son mayores en el caso del modelo LFFF.

Continuaremos realizando estas comparaciones aplicadas a casos particulares y probando la validez de ambos modelos a distintas escalas espaciales. Calcularemos para ambos modelos la localización de estructuras topológicas, en las cuales el campo magnético puede reconectarse, y analizaremos cual de los dos modelos resulta más consistente con las observaciones.

Referencias

Alissandrakis C.E., 1981, *A&A*, 100, 197
 Fuhrmann M., Seehafer N., Valori G., 2007, *A&A*, 476, 349
 Mastrano A., Wheatland M.S., Gilchrist S.A., 2018, *Solar Phys.*, 293, 130

AR	Modelo	$E [10^{32} \text{ erg}]$	$H [10^{42} \text{ Mx}^2]$
11836	LFFF	3.18	6.42
	NLFFF	1.12	2.13
11504	LFFF	29.31	121.82
	NLFFF	10.17	16.22

Tabla 1: Energía (E) y helicidad magnética (H) calculadas a partir de los modelos NLFFF y LFFF para las dos ARs estudiadas.

Press W.H., et al., 2007, *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*, 3 ed., Cambridge University Press, New York, NY, USA

Valori G., Démoulin P., Pariat E., 2012, *Solar Phys.*, 278, 347

Valori G., Kliem B., Keppens R., 2005, *A&A*, 433, 335

Valori G., et al., 2013, *A&A*, 553, A38

Wheatland M.S., Sturrock P.A., Roumeliotis G., 2000, *ApJ*, 540, 1150

Wiegmann T., Inhester B., Sakurai T., 2006, *Solar Phys.*, 233, 215