



Configuración magnética preruptiva de la región NOAA 12127 mediante extrapolación no lineal del campo

L.A. Merenda^{1,2}, F.A. Iglesias^{2,3}, C.H. Mandrini⁴ & H. Cremades^{2,3}

¹ *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNCuyo, Argentina*

² *CEDS, Facultad Regional Mendoza, UTN, Argentina*

³ *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

⁴ *Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina*

Contacto / lucianomerenda3@gmail.com

Resumen / Estudiamos las propiedades magnéticas de la región activa NOAA 12127 previas a una fulguración clase M1.5, acompañada de una eyección coronal de masa, el 1 de agosto de 2014. Estimamos su campo magnético coronal preruptivo mediante una extrapolación no lineal libre de fuerza y comparamos los resultados con imágenes en H α y 171 Å. El campo extrapolado logra reproducir la morfología de configuraciones magnéticas asociadas a un filamento y arcos coronales, identificados en la región.

Abstract / We studied the magnetic properties of active region NOAA 12127 previous to a M1.5-class flare, that was accompanied by a coronal mass ejection, on the August 1, 2014. We estimated the pre-eruptive coronal magnetic field using a non-linear force-free extrapolation, and compared the results with images in H α and 171 Å. The extrapolated field is able to reproduce the general morphology of the magnetic configurations linked to a filament and several coronal loops identified.

Keywords / Sun: filaments, prominences — Sun: magnetic fields — Sun: coronal mass ejections (CMEs)

1. Introducción

Las eyecciones coronales de masa (CMEs, por sus siglas en inglés) se originan principalmente en regiones activas (ARs, por sus siglas en inglés), donde la emergencia de tubos de flujo magnético con torsión contribuye a la acumulación de energía no potencial y de helicidad del campo magnético (B). En la baja corona, la presión magnética domina sobre la presión del plasma, por lo que cambios abruptos asociados a la reconexión de las líneas de campo, liberan grandes cantidades de energía magnética en forma de energía cinética y térmica del plasma, alimentando así eventos violentos como las CMEs. Se han propuesto diferentes mecanismos de inicio de las CMEs. Se pueden mencionar la emergencia de tubos de flujo magnético, la reconexión de líneas de campo debajo o por encima de un tubo de flujo preexistente, el exceso de torsión en el tubo de flujo y otros (por referencias ver Iglesias et al. 2020). Sin embargo, no se ha llegado a un consenso sobre cuál es el principal mecanismo, pues se requiere de mediciones detalladas del campo coronal.

En la actualidad no es posible obtener magnetogramas de alta sensibilidad y resolución en la corona, debido principalmente a la baja relación señal a ruido y a los campos magnéticos débiles. En consecuencia, se recurre a estimaciones del campo coronal utilizando extrapolaciones de magnetogramas fotosféricos. Estas técnicas asumen un campo magnético coronal libre de fuerzas (FF, por sus siglas en inglés), lo que equivale a suponer que la densidad de corriente es paralela al campo magnético local ($\nabla \times B = \alpha B$). El modelo de campo

puede ser lineal o no lineal (LFFF o NLFFF, por sus siglas en inglés) según se considere a la variación espacial del parámetro α nula o no, respectivamente. Los resultados de las extrapolaciones pueden calificarse comparando con imágenes en el ultravioleta de arcos coronales. Si bien los modelos LFFF se han utilizado exitosamente en ARs, existe evidencia observacional de que el parámetro α no es constante (Wiegmann & Neukirch, 2002). Por otra parte, estos modelos no dan una correcta estimación del contenido de energía magnética libre o de la helicidad magnética, cantidades cruciales para la comprensión de los mecanismos de inicio de las CMEs.

En este trabajo analizamos las propiedades magnéticas de una AR previas a la erupción de una CME y modelamos el campo magnético coronal mediante una extrapolación NLFFF.

2. Datos

La AR seleccionada es la NOAA 12127. La misma fue observada por el magnetómetro Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) a bordo del *Solar Dynamics Observatory* (SDO) y se encuentra en una ubicación cercana al meridiano central, reduciendo efectos de proyección. El evento eruptivo analizado es una fulguración de clase M1.5 en rayos X blandos que ocurrió el 01 de agosto del 2014 y fue acompañada de una CME. El campo magnético coronal de esta AR no ha sido estudiado previamente.

El magnetograma vectorial y los parámetros fotosféricos de la región, con una cadencia de 720 s dentro de un margen de ± 5 h del tiempo de erupción obser-

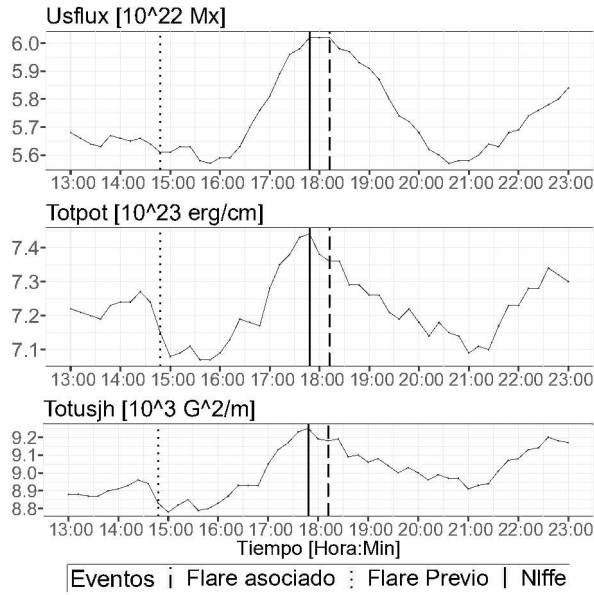


Figura 1: Parámetros fotosféricos de la región SHARP que incluye a la AR 12127. Con líneas verticales se indica la hora de ocurrencia de la fulguración (discontinua) de la extrapolación NLFFF del campo (sólida), y de una fulguración previa en la AR 12130 cercana (punteada).

vado, se obtuvieron de la serie Space-weather HARP (SHARPs) correspondiente (Bobra et al. 2014). Analizamos la evolución temporal de parámetros magnéticos fotosféricos que generalmente se asocian a la ocurrencia de un evento eruptivo, en particular el flujo magnético (Usflux), la helicidad de la corriente total (Totusjh) y un *proxy* de la energía magnética libre (Totpot). Las series temporales de estas magnitudes se muestran en la Fig. 1.

Se procesaron imágenes en 171 Å del instrumento Atmospheric Imaging Assembly (AIA) abordo de SDO, y del telescopio Halpha Solar Telescope for Argentina (HASTA) del Observatorio Félix Aguilar en San Juan, para identificar arcos coronales. Inspeccionamos además los datos correspondientes al sensor de flujo en rayos X blandos del satélite GOES-15 y se pudo asociar a la AR estudiada una fulguración $M1.5$ con máximo a las 18:13 UT del 01 de agosto de 2014. Investigando imágenes de los coronógrafos LASCO a bordo del *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) y las imágenes en intensidad de AIA 304 Å a bordo de SDO, pudimos asociar a la región bajo estudio una CME. Esta CME* es de tipo Halo y se aprecia en LASCO C2 a partir de las 18:36:05, posee una velocidad lineal media de 789 km s^{-1} , aceleración media de -15.2 ms^{-2} , masa de $4.3 \times 10^{15} \text{ g}$ y energía cinética $1.31 \times 10^{31} \text{ erg}$.

3. Extrapolación no lineal del campo

Como objetivo principal de este trabajo, realizamos la extrapolación NLFFF del campo fotosférico previo a la ocurrencia de la fulguración. Utilizamos la implementa-

*Parámetros derivados del catálogo https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

ción de T. Wiegelmann (Wiegelmann & Inhester, 2010), la misma no ha sido explorada por otro grupo en Argentina y nos fue provista por el autor. El proceso consta de dos partes que se detallan a continuación.

Primero se preprocesan el magnetograma vectorial fotosférico, a fin de obtener una condición de contorno inferior que sea más consistente con la hipótesis FF, y que este suavizado para disminuir el trabajo computacional. Para esto se busca minimizar el balance neto de flujo (ϵ_{flux}), de fuerza (ϵ_{force}) y de torque (ϵ_{torque}) magnéticos adimensionales, definidos en Wiegelmann et al. (2006). Luego del preprocesado la variación porcentual fue del +16%, -99% & -99% respectivamente.

Segundo, se comienza la extrapolación calculando una condición inicial en forma de un campo coronal puramente potencial. Se parte de esta condición inicial y se itera para ajustar una solución que minimice una métrica de error L que es la suma de las condiciones de campo FF, de divergencia nula para el campo magnético y el error con la condición de contorno inferior,

$$L = \int_V w_f \frac{|(\nabla \times B) \times B|}{B^2} + w_d |\nabla \cdot B| d^3V + \int_S (B - B_{obs}) \cdot W \cdot (B - B_{obs}) d^2S. \quad (1)$$

Aquí w_f y w_d son pesos que valen 1 en toda la caja excepto en los bordes laterales y superior, donde valen 0 (con una transición gradual). W es una matriz diagonal que se calcula a partir del error (nivel de ruido) en el magnetograma de entrada (B_{obs}). A fin de minimizar los efectos en la convergencia de los errores de medición de B_{obs} , realizamos la extrapolación 3 veces. Comenzando con un alto (x8) promediado espacial del magnetograma de entrada, y utilizando en cada sucesiva extrapolación NLFFF el resultado de la anterior, debidamente interpolado para incrementar la resolución espacial hasta la final (la mitad de la del magnetograma SHARP).

4. Resultados y discusión

El campo coronal extrapolado puede verse en las Fig. 2 y 3. El valor obtenido para las métricas de error $L1 = 7.9794$ (hipótesis FF), $L2 = 5.3629$ (Divergencia cero), el ángulo promedio entre el campo y la densidad de corriente es de 8.7962° . Los valores de los parámetros que comparan el campo con la solución potencial definidos por Schrijver et al. (2006) son, para el vector de correlación 0.858875 (1), para el producto de Cauchy-Schwartz 0.774723 (1), para el vector de error normalizado 0.679162 (0), para el vector de error medio 1.019073 (0) y para la energía magnética del campo extrapolado relativa al campo potencial (energía magnética libre) 1.297440 (1), entre paréntesis el valor para una reconstrucción perfecta. De la Fig. 2 puede apreciarse que el campo coronal obtenido por el modelo NLFFF puede representar cualitativamente a los arcos coronales vistos en 171 Å. Además, de la Fig. 3, puede verse como las líneas de campo presentan una importante torsión cerca del filamento visible en 304 Å y $H\alpha$, este tipo de estructuras topológicas son imposibles de reproducir por un modelo LFFF.

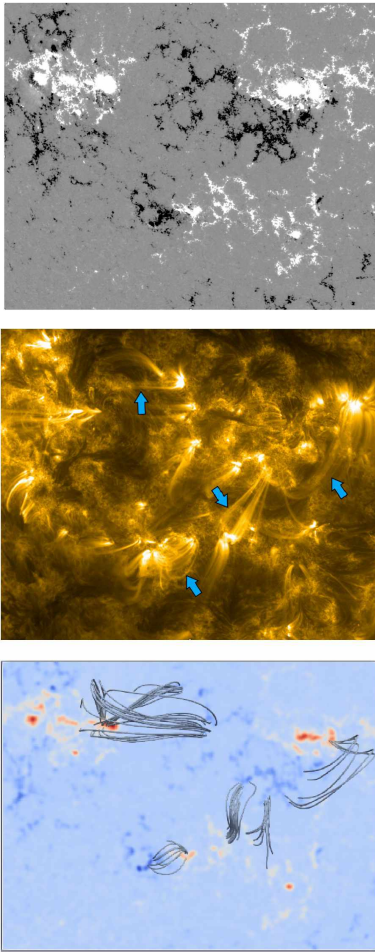


Figura 2: *Panel superior*: magnetograma en la dirección de la visual de HMI. *Panel Medio*: AIA 171 Å. Las flechas azules apuntan a lazos coronales. *Panel inferior*: líneas en tres dimensiones (3D) seleccionadas del campo extrapolado dibujadas sobre el magnetograma de fondo.

El evento (fulguración y CME asociada) tiene lugar luego de un período (~ 2 h) de persistente emergencia de flujo magnético (Fig. 1a) que trae asociado un incremento del proxy de la energía magnética libre (Fig. 1b). Esto está de acuerdo con la energía libre del campo extrapolado de $\sim 30\%$. Parte de esta energía se libera durante el proceso de reconexión magnética que da origen a la fulguración observada (notar la reducción en la helicidad de corriente luego de la fulguración en la Fig. 1b), e impulsa parcialmente la CME. La CME es masiva, un orden de magnitud mayor que los valores medios reportados en Vourlidas et al. (2010) y con una velocidad elevada relativa al viento solar lento típico ($< 500 \text{ km s}^{-1}$), por lo que es esperable un perfil cinemático desacelerado como el observado.

Como trabajo futuro, compararemos cuantitativamente el campo obtenido con el resultado de una extrapolación LFFF (Mandrini et al., 1996) para verificar la robustez de los resultados y las diferencias. Además, estudiaremos diversos escenarios de reconexión mediante un análisis de la topología coronal y su dinámica, inclu-

yendo el cálculo de helicidad magnética, la localización de puntos nulos y cuasiseparatrices magnéticas.

Agradecimientos: Este trabajo se realizó bajo la beca “Estímulo a la Investigación Científica” de la A.A.A. Agradecemos a Julia Chifu y Thomas Wiegelmann por proveer el código para calcular la extrapolación NLFFF y su valiosa ayuda. También a Federico Nuevo por su ayuda con el programa PARAVIEW.

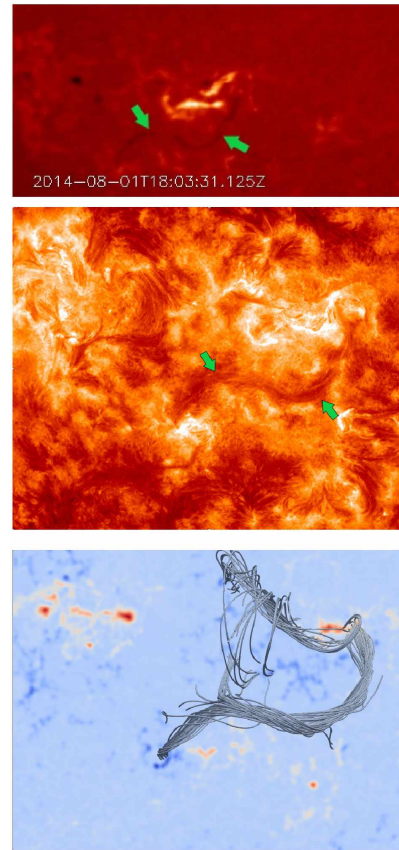


Figura 3: *Panel superior*: imagen en $H\alpha$ de HASTA. *Panel medio*: AIA 304 Å. *Panel inferior*: líneas 3D seleccionadas del campo extrapolado que presentan una alta torsión, dibujadas sobre el magnetograma de fondo. Las flechas verdes apuntan a un filamento.

Referencias

- Bobra M.G., et al., 2014, *Solar Phys.*, 289, 3549
 Iglesias F.A., et al., 2020, *Adv. Space Res.*, 65, 1641
 Mandrini C.H., et al., 1996, *Solar Phys.*, 168, 115
 Schrijver C.J., et al., 2006, *Solar Phys.*, 235, 161
 Vourlidas A., et al., 2010, *Solar Phys.*, 261, 53
 Wiegelmann T., Inhester B., 2010, *A&A*, 516, A107
 Wiegelmann T., Inhester B., Sakurai T., 2006, *Solar Phys.*, 233, 215
 Wiegelmann T., Neukirch T., 2002, *Solar Phys.*, 208, 233