

Estudio de Validación Tomográfica del modelo MHD AWSoM

D.G. Lloveras¹, A.M. Vásquez¹, F.A. Nuevo¹, C. Mac Cormack¹, N. Sachdeva²,
W. Manchester IV², B. Van der Holst², & R.A. Frazin²

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

² *Climate and Space Sciences and Engineering, Universidad de Michigan, EEUU.*

Contacto / dlloveras@iafe.uba.ar

Resumen / Los modelos magnetohidrodinámicos (MHD) tridimensionales (3D), necesarios para modelar y predecir el clima espacial, deben ser validados observacionalmente. A escala global, esto puede ser hecho mediante tomografía de medida de emisión diferencial (DEMT), que provee resultados 3D de densidad y temperatura electrónica en la baja corona ($1.0 - 1.25 R_{\odot}$). Realizamos una validación DEMT de la versión más reciente del Alfvén Wave Solar Model (AWSoM) del Space Weather Modeling Framework (SWMF). Se lleva a cabo un análisis comparativo a lo largo de las líneas de campo de la densidad y temperatura electrónicas del modelo y la tomografía. Para este estudio se seleccionaron dos rotaciones de mínimo solar, una entre los ciclos solares (SC) 23 y 24, y otra entre los SCs 24 y 25. Discutimos las diferencias observadas entre el modelo y los productos tomográficos, y las limitaciones y posibles mejoras futuras para el modelo AWSoM.)

Abstract / Aiming model and forecast the space climate, the tri-dimensional (3D) magnetohydrodynamic (MHD) models are in need of observational validations. This can be done using the differential emission measure technique (DEMT) which provides 3D results of electronic density and temperature in the low corona ($1.0 - 1.25 R_{\odot}$). We performed a DEMT validation of the last version of the Alfvén Wave Solar Model (AWSoM) within the Space Weather Modeling Framework (SWMF). We carried out a comparative analysis along de magnetic field lines using thermodynamic quantities of the model and the tomography results. In this study we selected two rotations of the solar minimum between solar cycle (SC) 23 and 24, and the other one between SCs 24 and 25. We discuss the difference observed between the model and the observations, the limitations and the possible upgrades to the AWSoM model.)

Keywords / Sun: corona — Sun: fundamental parameters — Sun: UV radiation — Sun: abundances

1. Introducción

La observación y el modelado de la Corona solar resulta de gran relevancia para el entendimiento de la relación Sol-Tierra, ya que en la Corona es donde el viento solar es calentado, acelerado y tienen lugar eventos impulsivos como eyecciones de masa coronal, flares, etc. Predecir eventos de clima espacial y sus efectos geomagnéticos requieren modelos 3D precisos de la atmósfera solar basados en la física que se extiende desde la cromosfera, pasando por la corona, hasta la heliosfera. Estos modelos han evolucionado mucho a lo largo de los años, y conforme lo hacen necesitan ser validados mediante nuevas observaciones y más detalladas comparaciones.

En el presente trabajo nos focalizaremos en el modelo MHD coronal y de viento solar Alfvén Wave Solar atmosphere Model (AWSoM) que forma parte del space weather Modeling framework (SWMF) Tóth et al. (2012). El modelo utiliza calentamiento por ondas de Alfvén para proveer un modelo físico descriptivo 3D auto consistente de calentamiento coronal y aceleración de viento solar (Sokolov et al., 2013) (van der Holst et al., 2014).

A medida que el modelo adopta nuevas mejoras es necesario contrastar los resultados con observaciones. En una reciente publicación Sachdeva et al. (2019) llevó a cabo una validación de la última versión del modelo

para la rotación de Carrington (CR) CR2208 y CR2209 con datos in situ de ACE, Wind, SDO/AIA, Ulysses, SOHO/LASCO, IPS y OMNI. Los datos de AIA fueron procesados con la técnica tomográfica DEMT (Frazin et al., 2009) la cual permite obtener una distribución 3D de densidad y temperaturas electrónicas dentro del rango $1.0 - 1.25 R_{\odot}$. Llevaron a cabo comparaciones globales calculando la diferencia relativa pixel a pixel $RD = \frac{X_{AWSoM}}{X_{DEMT}} - 1$ a alturas constantes tanto para N_e como para T_e y se mostró que el modelo es capaz de reproducir las observaciones dentro de un $\sim 20 - 30 \%$.

Debido a que la corona es gobernada por el campo magnético, resulta de particular interés analizar la termodinámica de líneas de campo asociadas a distintas estructuras magnéticas (Streamer, Agujero coronal, etc.). Con esta idea en mente presentamos en este trabajo el primer esfuerzo de validación del modelo AWSoM en la baja corona comparando la termodinámica con un modelo semi empírico (DEMT) seleccionando distintas estructuras magnéticas. Para esto se seleccionó la rotación CR2082 correspondiente al mínimo de actividad solar del 2009 y una rotación de la fase de declinación actual CR2208 (septiembre 2018).

2. Método

El modelo AWSOM utiliza magnetogramas synopticos ADAPT-GONG (Arge et al., 2010) como condiciones de contorno en la fotosfera y permite obtener una estructura 3D de parámetros físicos (densidad y temperatura electrónica entre otros) entre $1.0R_{\odot}$ y 1 UA . El modelo presenta una región de transición extendida desde la fotosfera hasta $\sim 1.05R_{\odot}$, región que no se tuvo en cuenta en la comparación.

Por otro lado el modelo DENT utiliza como datos una serie temporal de imágenes EUV cubriendo media rotación solar permitiendo reconstruir la emisividad en forma 3D en la baja corona. Combinando la emisividad de todas las bandas del telescopio se obtiene la medida de emisión diferencial local (LDEM). Esta medida es una descripción cualitativa de la distribución térmica del plasma en cada celda de la grilla 3D de dimensión $0.01R_{\odot}$ en dirección radial y 2° en latitud y longitud.

En el presente trabajo se utilizaron imágenes obtenidas con STEREO/EUVI-A y SDO/AIA para CR2082 y CR2208 respectivamente. La selección es debido a que ambos períodos presentan baja actividad coronal, mostrando una corona altamente axysimétrica con agujeros coronales en la zona polar y un streamer dominante en las latitudes ecuatoriales. Las imágenes de EUVI están afectadas por contaminación de luz dispersa que fue removida aplicando a cada imagen una función dispersión del punto aplicada a cada pixel, para una explicación detallada sobre el método y el impacto en la reconstrucción tomográfica referirse a Shearer et al. (2012) y Lloveras et al. (2017) respectivamente. Para las imágenes de AIA no existe al momento de la escritura de este artículo una función de dispersión adecuada pero se estima que los telescopios de esta generación se ven menos afectados por esta contaminación.

Para llevar a cabo una comparación termodinámica a lo largo de líneas magnéticas se utilizó el campo dado por el modelo MHD. El modelo usa como condición de contorno el magnetograma y como condición inicial el modelo potencial con superficie fuente (PFSS) obtenido resolviendo la ecuación de Laplace, considerando campo radial en $2.5R_{\odot}$ y luego evolucionandolo en el tiempo (van der Holst et al., 2010). Los resultados termodinámicos de DENT y AWSOM son trazados a lo largo de las líneas de campo dentro de la grilla 3D.

3. Resultados

Como ejemplo de los productos tomográficos y del modelo MHD, mostramos en la Figura 1 cortes a una altura media de densidad y temperatura electrónica para ambos modelos y ambas rotaciones seleccionadas. La línea negra sólida demarca la frontera entre las líneas magnéticas abiertas (zona polar) de las líneas cerradas (zona ecuatorial). En los mapas de DENT las celdas negras representan celdas no reconstruidas por la técnica y fueron excluidas del análisis.

Estos mapas muestran rotaciones altamente axysimétricas con estructuras de N_e y T_e modeladas satisfactoriamente tanto en morfología como orden de magnitud.

Los resultados termodinámicos fueron trazada a lo largo de las líneas magnéticas. Los loops cerrados son separados en dos piernas desde la base hasta el ápice. Para cada línea abierta y cada pierna cerrada $N_e(r)$ fue ajustada a una solución hidrostática isotérmica y una escala de altura λ_n es determinada. Las variaciones de temperatura con la altura $T_e(r)$ son suaves y su promedio a lo largo de las piernas fue determinado para obtener un valor característico. Para este trabajo se tomó en consideración como subselección de estructuras magnéticas las regiones de los agujeros coronales (líneas abiertas) y la del streamer ecuatorial (líneas cerradas), una mas detallada selección de estructuras puede encontrarse en Lloveras et al. (2017).

Debido a que modelo MHD presenta unicamente loops con temperatura creciente, en esta comparación para los resultados DENT se seleccionaron las piernas $T_e(r)$ con correlación de Pearson $\rho > 0.5$ y p-valor < 0.05 dejando de lado a las piernas isotérmicas $|\rho| < 0.5$ y las piernas con temperatura decreciente $\rho < 0.5$. Las piernas $N_e(r)$ son linealizadas y se ajusta una recta. Los datos son sometidos a un test de hipótesis asumiendo la recta ajustada como el valor esperado y se descartan las piernas con p-valor < 0.05 .

Como ejemplo, la Figura 2 muestra distribución estadística de los resultados DENT y AWSOM para cada subregion seleccionada. Mientras que λ_n es consistente con las observaciones, AWSOM presenta diferencias $< 30\%$ en $\langle T_m \rangle$ y N_e según la rotación. Similares diferencias se observaron en los agujeros coronales.

4. Conclusiones y trabajo futuro

El modelo AWSOM reproduce las estructuras de streamer y agujero coronal de forma global. Es capaz de reproducir temperaturas crecientes en las estructuras magnéticas con una diferencia $< 30\%$. Para un análisis mas detallado, un enfoque diferente es requerido para proporcionar modelo de loops decrecientes en temperatura con la altura. Los modelados en densidad presentan escalas de altura λ_n muy similares y diferencias en la altura mas baja comparablemente posible ($1.05R_{\odot}$) $< 30\%$ según la rotación modelada. Esto demuestra un gran avance en la capacidad del modelo para reproducir la termodinámica de la baja corona.

Próximamente se llevará a cabo una comparación mas extensa y detallada utilizando subregiones cuidadosamente seleccionadas y se incluirá una comparación de flujo de energía entrante.

Referencias

- Arge C.N., et al., 2010, *AGU Fall Meeting Abstracts*, vol. 2010, SM51A–1749
- Frazin R.A., Vásquez A.M., Kamalabadi F., 2009, *ApJ*, 701, 547
- Lloveras D.G., et al., 2017, *SoPh*, 292, 153
- Lloveras D.G., et al., 2017, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 59, 145
- Sachdeva N., et al., 2019, *arXiv e-prints*, arXiv:1910.08110
- Shearer P., et al., 2012, *ApJL*, 749, L8
- Sokolov I.V., et al., 2013, *ApJ*, 764, 23

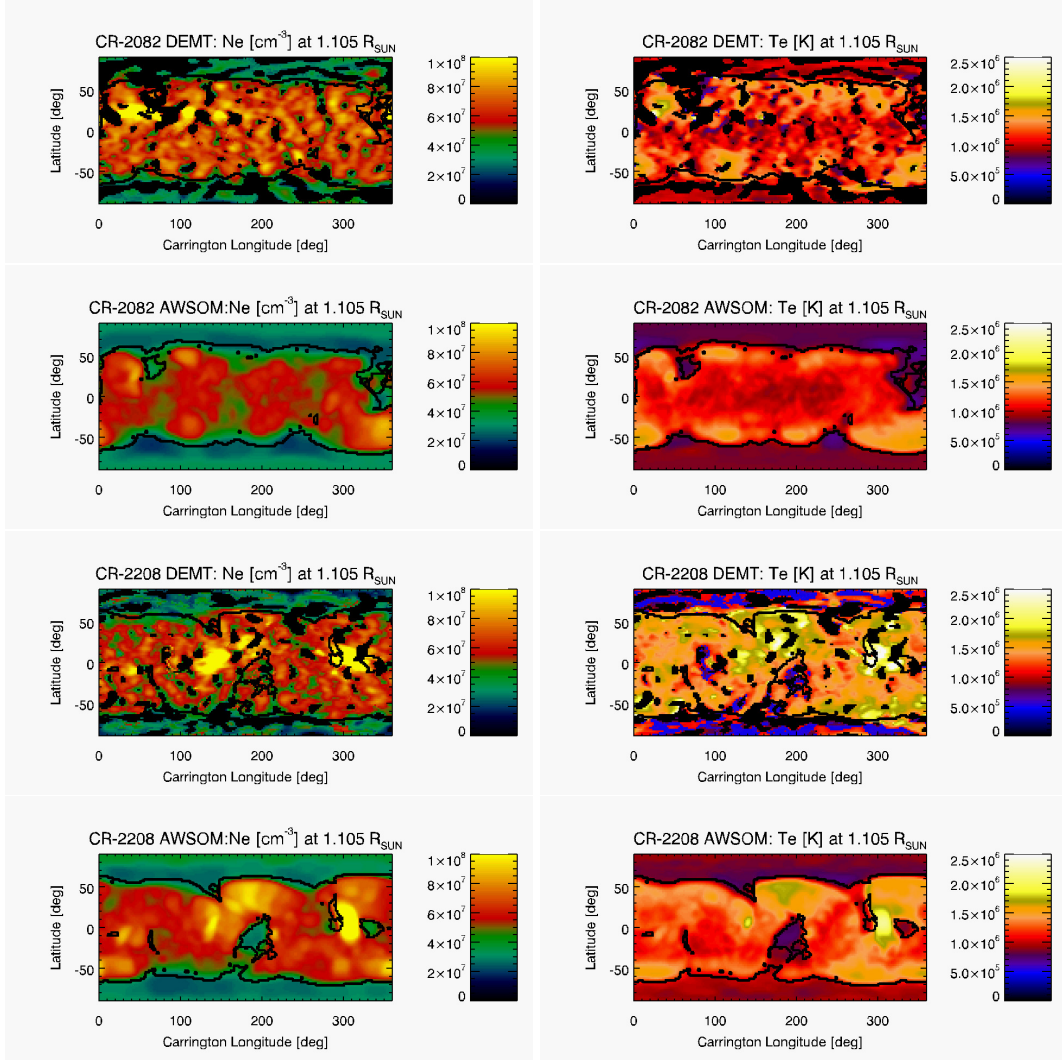


Figura 1: Mapas de Carrington de T_e (derecha) y N_e (izquierda) de CR-2082 y CR-2208 a $1.105 R_{\odot}$ obtenidas con DEMT y con AWSOM. Las celdas negras corresponden a regiones no reconstruidas, mientras que la curva negra indica el límite de la región magnéticamente abierta en los polos de la magnéticamete cerrada en el Streamer.

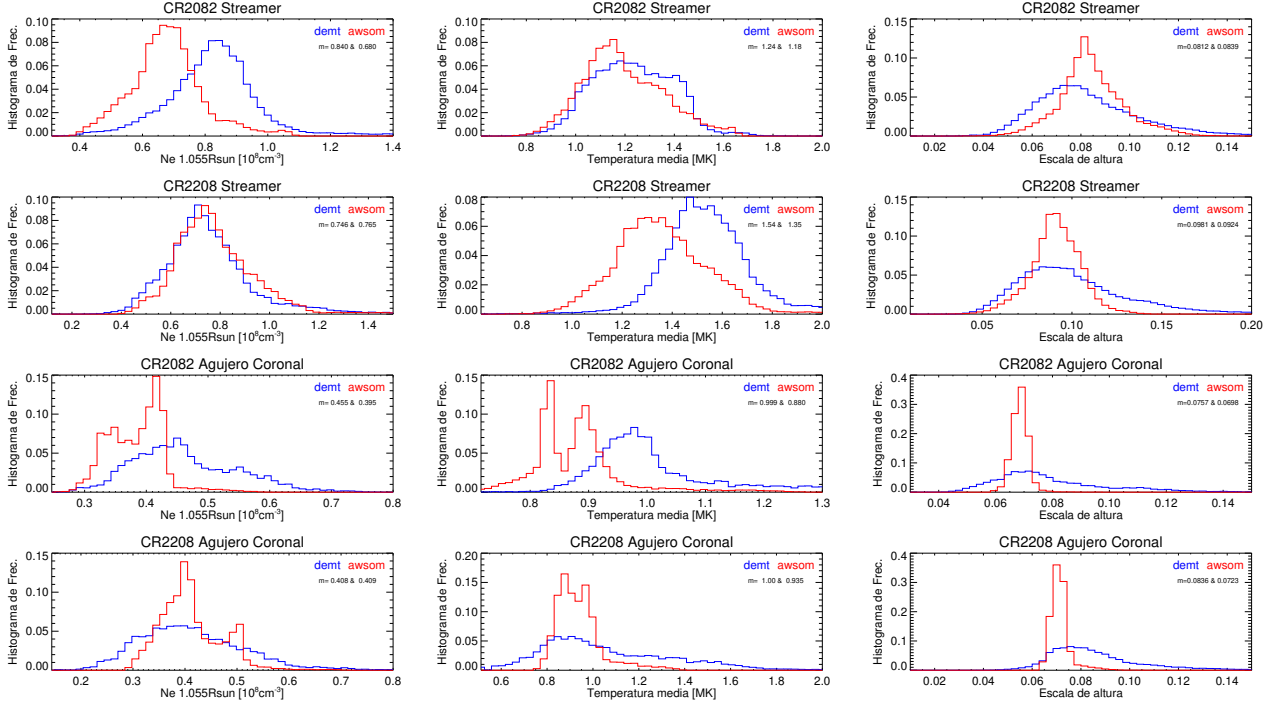


Figura 2: Histograma de frecuencia de CR-2082 y CR-2208 de N_e a $1.055 R_\odot$, escala de altura de la densidad electrónica y $\langle T_m \rangle$. En azul se muestran los resultados obtenidos con DEMT y en rojo con AWSOM junto con la mediana de la respectiva estadística para la región del streamer.

Tóth G., et al., 2012, Journal of Computational Physics, 231, 870

van der Holst B., et al., 2010, ApJ, 725, 1373

van der Holst B., et al., 2014, ApJ, 782, 81