



# Estudio de Validación Tomográfica del Modelo MHD AWSoM

D.G. Lloveras<sup>1</sup>, A.M. Vásquez<sup>1</sup>, F.A. Nuevo<sup>1</sup>, C. Mac Cormack<sup>1</sup>, N. Sachdeva<sup>2</sup>,  
W. Manchester IV<sup>2</sup>, B. Van der Holst<sup>2</sup>, & R.A. Frazin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina*

<sup>2</sup> *Climate and Space Sciences and Engineering, Universidad de Michigan, EEUU.*

*Contacto* / dlloveras@iafe.uba.ar

**Resumen** / Los modelos magnetohidrodinámicos (MHD) tridimensionales (3D) de la corona solar, 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** / The three-dimensional (3D) magnetohydrodynamic (MHD) models of the solar corona, necessary to model and predict space weather, must be validated observationally. On a global scale, this can be done using differential emission measure tomography (DEMT) technique, which provides 3D results of electron density and temperature in the low corona ( $1.0 - 1.25 R_{\odot}$ ). We performed a DEMT validation of the most recent version of Alfvén Wave Solar Model (AWSoM) within the Space Weather Modeling Framework (SWMF). A comparative analysis is carried out along the field lines of the electronic density and temperature of the model and tomography. For this study two solar minimum rotations are selected, one between solar cycles (SC) 23 and 24 and another between SCs 24 and 25. We discuss the differences observed between the model and tomographic products and the limitations and possible improvements future for 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 estudio de la relación Sol-Tierra, ya que 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 requiere modelos 3D de la atmósfera solar 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 análisis detallados.

En el presente trabajo nos focalizaremos en el modelo MHD 3D coronal y de viento solar Alfvén Wave Solar 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 es mejorado es necesario contrastar los resultados con observaciones. En una reciente publicación Sachdeva et al. (2019) llevaron 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  $1.0 - 1.25 R_{\odot}$ . Sachdeva et al. (2019) calcularon la diferencia relativa entre los resultados de AWSoM y DEMT. Tanto para la densidad electrónica  $N_e$  como para la temperatura electrónica  $T_e$  los resultados de ambos modelos difieren en el rango  $10 - 30\%$  en diferentes regiones coronales.

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 un magnetograma sinóptico ADAPT-GONG (Arge et al., 2010) como condición de

contorno. Como condición inicial utiliza el modelo potencial con superficie fuente (PFSS) obtenido resolviendo la ecuación de Laplace, considerando campo radial en  $2.5 R_{\odot}$  y luego evolucionándolo en el tiempo (van der Holst et al., 2010). Finalmente permite obtener una estructura 3D de parámetros físicos (densidad y temperatura electrónica entre otros) entre  $1.0 R_{\odot}$  y  $1 \text{ UA}$ . La última versión del modelo presenta una región de transición extendida desde la fotosfera hasta  $\sim 1.05 R_{\odot}$ , 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  $0.01 R_{\odot}$  en dirección radial y  $2^{\circ}$  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 con fuerte simetría axial y con agujeros coronales en la zona polar y un streamer dominante en las latitudes ecuatoriales. Para el procesamiento de imágenes y la reconstrucción tomográfica se aplicaron todos los procedimientos en su estado-del-arte, detallados en Lloveras et al. (2017).

Para llevar a cabo una comparación termodinámica a lo largo de líneas magnéticas se utilizó el campo dado por el modelo MHD. Para este fin se determina la geometría de las líneas de campo desde coordenadas específicas de un punto de partida tanto hacia el exterior como hacia el interior. Para muestrear uniformemente el volumen abarcado por las reconstrucciones DENT, se seleccionó un punto de partida en el centro de cada celda de la grilla 3D a 6 alturas espaciadas uniformemente desde  $1.02$  a  $1.25 R_{\odot}$ . Cada línea de campo trazada se clasifica como "abierta" si se cruza con la superficie de origen establecida en  $2.5 R_{\odot}$  (donde las líneas se vuelven radiales), o como "cerrada" de lo contrario. Luego los resultados termodinámicos de DENT y AWSOM son trazados a lo largo de las líneas de campo abiertas y cerradas 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 axi-simétricas 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  $\lambda_n$  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  $\lambda_n$  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  $\lambda_n$  muy similares y diferencias en la altura mas baja comparablemente posible ( $1.05 R_{\odot}$ )  $< 30\%$  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
- Sokolov I.V., et al., 2013, *ApJ*, 764, 23
- Tóth G., et al., 2012, *Journal of Computational Physics*, 231, 870

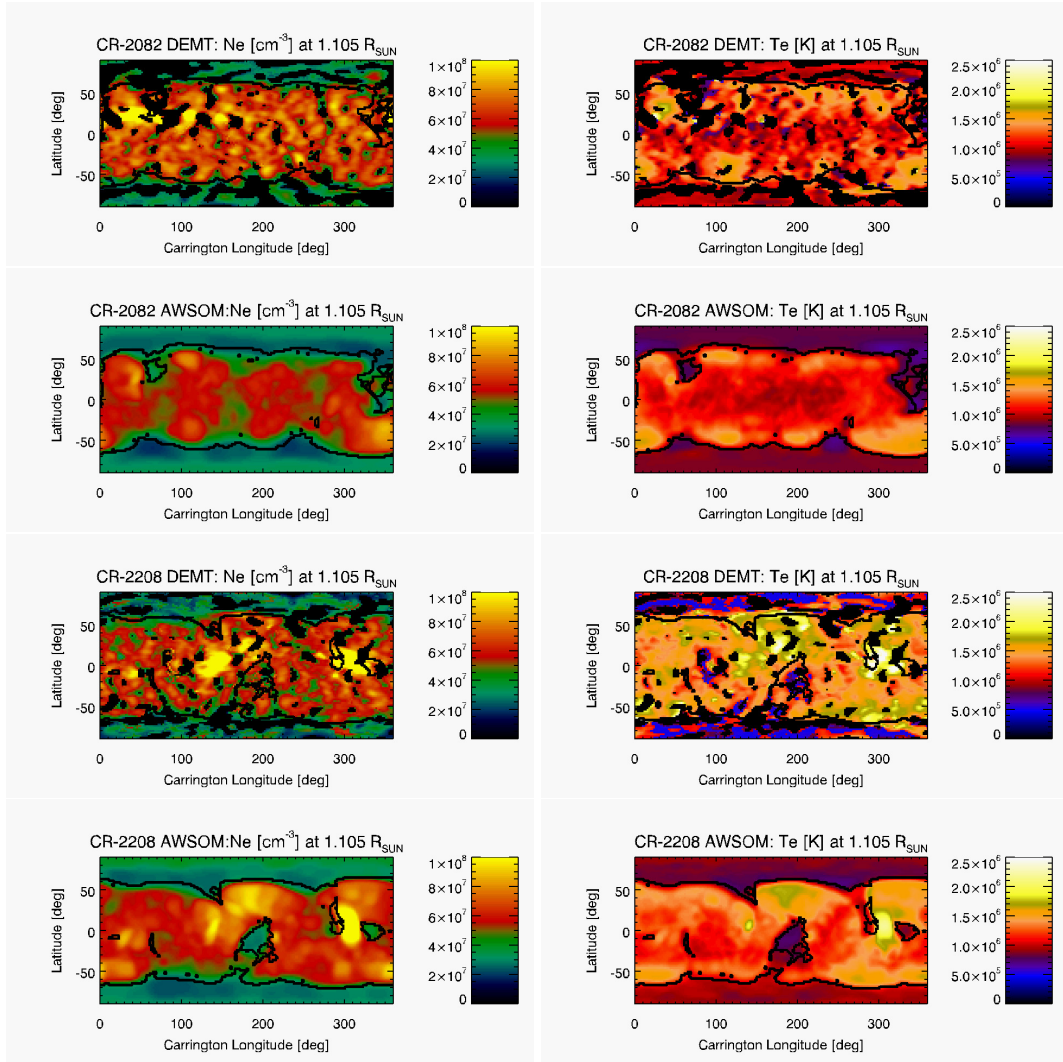


Figura 1: Mapas de Carrington de  $T_e$  (derecha) y  $N_e$  (izquierda) de CR-2082 y CR-2208 a  $1.105 R_{\odot}$  obtenidas con DENT y con AWSOM. En los mapas tomográficos, las celdas negras corresponden a regiones no reconstruidas. En todos los paneles las curvas negras indican las fronteras entre las regiones magnéticas abiertas y cerradas (determinadas en base al modelo magnético de AWSOM).

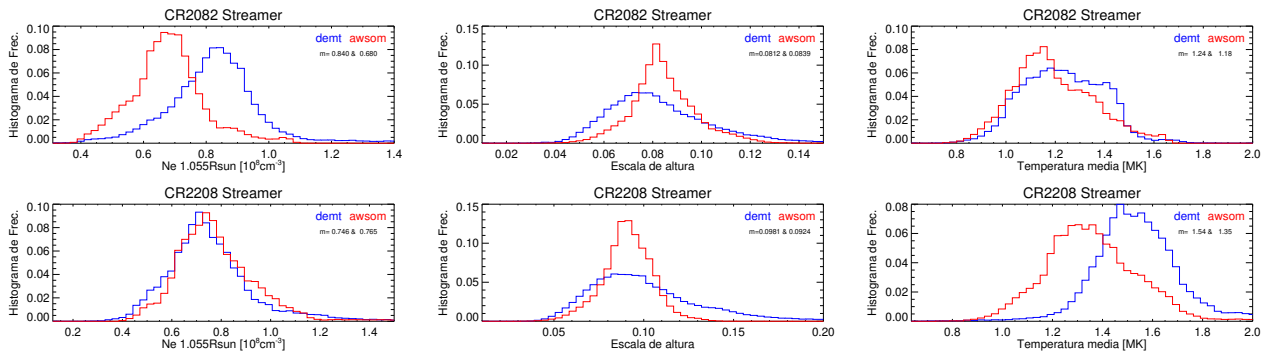


Figura 2: Histograma de frecuencia de CR-2082 y CR-2208 de  $N_e$  a  $1.055 R_{\odot}$ , escala de altura de la densidad electrónica y  $\langle T_m \rangle$ . En azul se muestran los resultados obtenidos con DENT y en rojo con AWSOM junto con la mediana de la respectiva estadística para la región del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

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

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