

# Boletín *de la* Asociación Argentina *de* Astronomía

2021

Boletín de artículos científicos 62<sup>a</sup> Reunión Anual  
Asociación Argentina de Astronomía  
Rosario, Provincia de Santa Fe, octubre de 2020



# Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía

BAAA, Vol. 62



Asociación Argentina de Astronomía. Comité Editorial BAAA Vol. 62, correspondiente a la reunión anual 2020:  
Alberto Marcos Vásquez (Editor en Jefe), Francisco Andrés Iglesias (Secretario Editorial),  
Mario Agustín Sgró (Técnico Editorial) y Estela Marta Reynoso (Editora Invitada)



## **Asociación Argentina de Astronomía**

Fundada en 1958

Personería jurídica 11811 (Buenos Aires)

### **Comisión Directiva**

Leonardo J. Pellizza (presidente)  
Susana E. Pedrosa (vicepresidenta)  
Rodrigo F. Díaz (secretario)  
Daniel D. Carpintero (tesorero)  
Andrea V. Ahumada (vocal 1)  
Andrea P. Buccino (vocal 2)  
Georgina Coldwell (1er suplente)  
Hebe Cremades (2do suplente)

### **Comisión Revisora de Cuentas**

Sofía A. Cora  
Gerardo Juan M. Luna  
Luis R. Vega

### **Comité Nacional de Astronomía**

Cristina Mandrini (secretaria)  
Lydia Cidale  
Hebe Cremades  
Federico González  
Hernán Muriel

## **62ª Reunión Anual de la AAA**

Rosario, Provincia de Santa Fe

13 al 16 de octubre de 2020

Organizada por la Universidad Nacional de Rosario y el Complejo Astronómico Municipal "Galileo Galilei"

### **Comité Científico**

Estela M. Reynoso (IAFE, presidente)  
Andrea Ahumada (OAC)  
Hebe Cremades (UTN - FRM)  
Rubén Vázquez (IALP)  
Guillermo Bosch (IALP)  
Emilio Donoso (ICATE)  
Florencia Vieyro (IAR)  
César Bertucci (IAFE)

### **Comité Organizador Local**

Diego Sevilla (FCEIA, presidente)  
Silvia Morales (FCEIA)  
Daniel Severín (FCEIA)  
Carlos Silva (FCEIA)  
Guillermo Ibañez (FCEIA)  
Manuel Bertoldi (FCEIA, CAMR)  
Sandra Carracedo (CAMR)  
Fernanda Pacenti (CAMR)  
Juan I. Gerini (CAMR)  
Raúl Barontini (CAMR)  
Guillermo García (CAMR)  
Lisandro Duri (IPS-UNR)

La organización agradece el auspicio y ayuda financiera del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

### **Publicado por**

Asociación Argentina de Astronomía  
Paseo del Bosque s/n, La Plata, Buenos Aires, Argentina

ISSN 1669-9521 (versión digital)  
ISSN 0571-3285 (versión impresa)

Créditos:

Diseño de portada: Adrián Rovero y Andrea León  
Confeccionado con la clase "confproc" en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

Impreso en Buenos Aires, julio de 2021



# Caracterización dinámica y termodinámica de una eyección coronal de masa durante su propagación en la corona solar

L. Di Lorenzo<sup>1,2</sup>, L.A. Balmaceda<sup>3,4</sup> & H. Cremades<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Física Aplicada Dr. Giorgio Zgrablich, UNSL, Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

<sup>3</sup> George Mason University, EE.UU.

<sup>4</sup> Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration, EE.UU.

<sup>5</sup> CEDS, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

Contacto / leonardodilorenzo@gmail.com

**Resumen** / Las eyecciones coronales de masa (ECMs) constituyen uno de los factores determinantes de la meteorología del espacio. A pesar de ser ampliamente estudiadas, aún no se ha determinado en detalle cómo evolucionan su estructura interna y propiedades termodinámicas en la corona solar y hasta 1 UA. Si bien varias de estas propiedades como el índice politrópico y temperatura, entre otras, han podido ser estimadas a partir de mediciones *in situ*, su determinación en la corona no ha sido posible de forma sistemática. En este trabajo se estudia la evolución de una ECM que ocurrió el día 16 de junio de 2010, en un rango de distancias heliosféricas de 4 a 15 radios solares. A partir de los perfiles de velocidad y aceleración, se calculan diferentes magnitudes dinámicas y termodinámicas, en particular las fuerzas que interactúan y el índice politrópico, utilizando el modelo FRIS (*Flux Rope Internal State*). Se obtuvo que la fuerza de Lorentz domina sobre las demás fuerzas, y que el índice politrópico tiende a 1 a medida que la ECM se propaga. Asimismo, se analiza el efecto del uso de distintos ajustes a los perfiles cinemáticos en el cálculo de las cantidades mencionadas.

**Abstract** / Coronal mass ejections (CMEs) are key factors for determining space weather conditions. Despite having been widely studied, to date it has not been possible to ascertain how their internal structure and thermodynamic properties evolve in the solar corona and up to 1 AU. Although several of these properties like the polytropic index and temperature, among others, have been estimated from *in situ* measurements, their determination at coronal heights has not been possible in a systematic manner. In this report we analyze the evolution of a CME that erupted on 16 June 2010, in a range of heliospheric distances of 4–15 solar radii. From the speed and acceleration profiles, we calculate various dynamic and thermodynamic quantities, in particular the interacting forces and the polytropic index, by means of the Flux Rope Internal State (FRIS) model. We found that the Lorentz force dominates over the other forces, and that the polytropic index approaches to 1 as the CME propagates. In addition, the impact of using different fittings to the kinematic profiles in the calculation of the mentioned quantities is analyzed.

**Keywords** / Sun: coronal mass ejections (CMEs) — Sun: corona — Sun: heliosphere — solar–terrestrial relations

## 1. Introducción

Las ECMs son los fenómenos más energéticos que ocurren en la atmósfera solar. Comenzaron a ser observadas en la década de los 70 por medio de coronógrafos y son eyectadas del Sol hacia el medio interplanetario con velocidades que van desde  $100 \text{ km s}^{-1}$  hasta valores por encima de  $2000 \text{ km s}^{-1}$ . Las propiedades termodinámicas de las ECMs, como el índice politrópico, la temperatura y la tasa de calentamiento, han sido estudiadas estadísticamente con mediciones realizadas *in situ* (v.g. Liu et al., 2006). Para entender mejor el comportamiento de las ECMs durante su propagación y expansión, es necesario estudiar estas cantidades en la corona a distancias superiores a  $4 R_{\odot}$ . Las ECMs son el principal agente modificador de la meteorología del espacio, por lo que su estudio es de particular interés en la comunidad científica para predecir las consecuencias de las tormentas geomagnéticas asociadas a estos fenómenos.

## 2. Descripción de los datos y metodología

Para determinar los parámetros morfológicos y geométricos de la ECM en 3D se aplica el modelo GCS (*Graduated Cylindrical Shell*, Thernisien, 2011) a distintos instantes de tiempo usando tripletes de imágenes simultáneas proporcionadas por instrumentos a bordo de las misiones *STEREO* y *SOHO*. Con los parámetros obtenidos en la reconstrucción 3D de la ECM podemos determinar el radio menor de la cuerda de flujo ( $R = h\kappa_{ar}/(1 + \kappa_{ar})$ ; ver Fig.1). El parámetro  $\kappa_{ar}$  es la razón de aspecto, que representa la tasa de expansión vs. la altura de la ECM y  $h$  es la altura heliocéntrica del frente de la ECM. Definimos  $L$  como la distancia desde la superficie del Sol hasta el centro de la ECM ( $L = h - R - R_{\odot}$ ) y  $D$  como distancia heliocéntrica del centro de la ECM ( $D = h - R$ ). La Fig. 2 muestra los perfiles de estas magnitudes en función de  $t$  y sus respectivos ajustes: cuadrático, cúbico y exponencial. A partir estas cantidades se obtienen la velocidad de

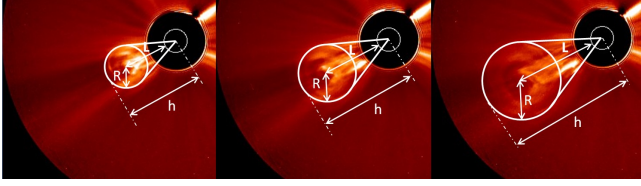


Figura 1: Representación gráfica de las magnitudes  $R$ ,  $L$  y  $h$ , superpuestas en una secuencia de imágenes de STEREO/SECCHI-COR2.

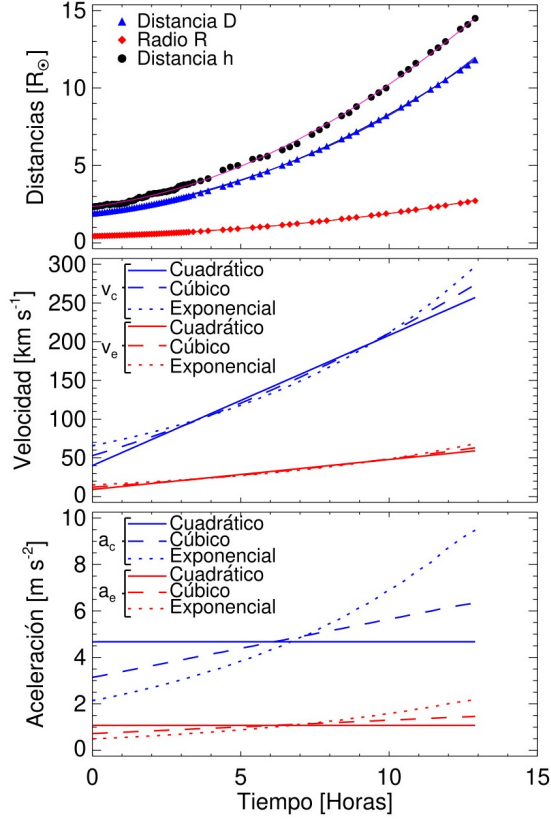


Figura 2: Caracterización cinemática de la ECM. *Superior*: Distancias  $h$ ,  $D$  y  $R$ . *Central*: Velocidad de expansión y propagación. *Inferior*: Aceleración de expansión y propagación, con sus respectivos ajustes.

expansión ( $v_e = dR/dt$ ), velocidad de propagación ( $v_c = dD/dt$ ), aceleración de expansión ( $a_e = d^2R/dt^2$ ) y aceleración de propagación ( $a_c = d^2D/dt^2$ ) en función de  $t$  (Fig. 2, paneles medio e inferior). Notar que las tres funciones utilizadas para los ajustes representan muy bien la evolución de  $D$ ,  $R$  y  $h$  en función de  $t$ , de manera que en el panel superior de la Fig. 2 las tres curvas aparecen superpuestas. En el panel inferior de la Fig. 2, podemos visualizar los perfiles de aceleración en donde se hace evidente la diferencia entre los ajustes realizados. Los valores obtenidos de  $D$ ,  $R$ ,  $v_e$ ,  $v_c$  y  $a_e$  son utilizados como parámetros de entrada en el modelo FRIS (Mishra & Wang, 2018, de aquí en adelante MW18). Este modelo asume que la ECM se comporta como una cuerda de flujo que evoluciona de manera auto-similar ( $\kappa_{ar}$  permanece constante) y que

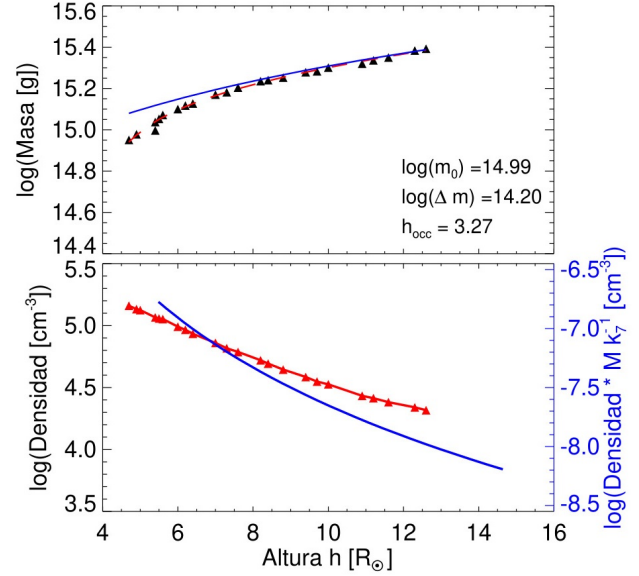


Figura 3: *Superior*: Cálculo y corrección de masas a partir de mediciones (símbolos y línea roja), junto con corrección por efecto del ocultador (línea azul). *Inferior*: Densidad de electrones a partir del modelo FRIS (línea azul) y de las mediciones (símbolos y línea roja).

la masa se conserva. El modelo plantea la ecuación de conservación del momento considerando la fuerza de Lorentz, la fuerza térmica y la fuerza centrífuga debida al movimiento poloidal del plasma dentro de la cuerda de flujo. El modelo no incluye una expresión explícita de la fuerza debido al arrastre por la interacción de la ECM con el viento solar, ya que su efecto es incorporado al utilizar las mediciones cinemáticas realizadas en la corona. Además de las fuerzas, utilizando el modelo FRIS podemos estimar las propiedades termodinámicas de la ECM como el índice politrópico (más detalles en MW18).

### 3. Análisis dinámico y termodinámico

Como el modelo FRIS considera que la masa permanece constante, estimamos la masa de la ECM a partir de imágenes de luz blanca para evaluar la validez de esta suposición. El cálculo de masa se realizó mediante el método descrito en Vourlidis et al. (2010). Los valores obtenidos se muestran en el panel superior de la Fig. 3 y son ajustados con la función propuesta por Bein et al. (2013) (línea roja) y luego corregidos por el efecto del ocultador del coronógrafo (línea azul). Observamos que hay un incremento de la masa durante la propagación de la ECM. Para calcular la densidad de electrones también fue necesario estimar el volumen de la ECM, mediante el método de Holzknicht et al. (2018). En el panel inferior de la Fig. 3 se muestra la densidad calculada a partir de los datos experimentales (rojo) y la estimación obtenida por el modelo FRIS (azul). Nótese que estos están dados en función de constantes desconocidas/arbitrarias que surgen al resolver las integrales para las diferentes fuerzas (más detalle en MW18).

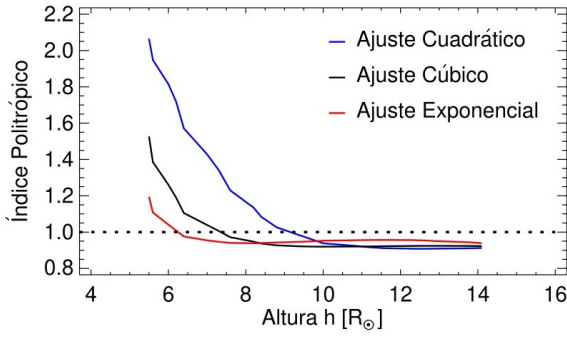


Figura 4: Índice politrópico, obtenido a partir del modelo FRIS utilizando los perfiles cinemáticos de la Figura 2.

En la Fig. 4 se grafica el índice politrópico que surge del modelo FRIS, a partir de los ajustes en la Fig. 2 como parámetros de entrada. En los tres casos se ven perfiles con comportamiento similar y tendiendo al mismo valor luego de  $\sim 10 R_{\odot}$ . También se analizan las fuerzas que actúan durante la expansión y propagación de la ECM. La variación de la razón de la fuerza de Lorentz ( $f_{em}$ ) y la fuerza térmica ( $f_{th}$ ) vs. la distancia heliocéntrica se muestra en el panel superior de la Fig. 5. La fuerza de Lorentz domina a la fuerza térmica y a medida que la ECM se propaga, esta razón va tendiendo a 1. En el panel central de la Fig. 5 también se ve que la fuerza de Lorentz domina sobre la fuerza centrífuga ( $f_p$ ) en todo el rango de distancias. Comparando ambas figuras es también notorio que la razón entre las fuerzas  $f_{em}/f_{th}$  es mucho mayor que la razón  $f_{em}/f_p$  y que las deducciones obtenidas son independientes del ajuste utilizado. Analizando el panel inferior de la Fig. 5, podemos ver que la fuerza de Lorentz posee signo negativo lo que indica que se opone a la expansión, mientras que las fuerzas térmica y centrífuga poseen signos positivos contribuyendo a la expansión de la ECM.

#### 4. Discusión y conclusiones

Con los datos mostrados en la Fig. 2 se aplicó el modelo FRIS, que permitió describir propiedades internas y termodinámicas de la ECM a alturas mayores a  $\sim 4 R_{\odot}$  y hasta  $15 R_{\odot}$ . El comportamiento del modelo FRIS no ha sido estudiado anteriormente comparando diferentes ajustes para los perfiles cinemáticos. Encontramos que los resultados son sensibles a la elección de los perfiles de velocidad y aceleración utilizados. Si bien no es posible elegir uno de estos ajustes como el mejor, evaluar distintas funciones analíticas permite acotar los rangos entre los que varían las cantidades estimadas.

En este trabajo analizamos la variación del índice politrópico y las fuerzas. En la Fig. 4 puede verse que el índice politrópico disminuye rápidamente entre 5 y  $10 R_{\odot}$ , mostrando la mayor variación en el caso del ajuste cuadrático. Sin embargo, independientemente de los varios ajustes realizados, el valor del índice politrópico es cercano a 1 a distancias mayores a  $10 R_{\odot}$ , lo que sugiere que estaríamos ante un proceso isotérmico. Valores similares fueron reportados por Liu et al. (2006), a partir de mediciones *in situ*. Al evaluar la contribución

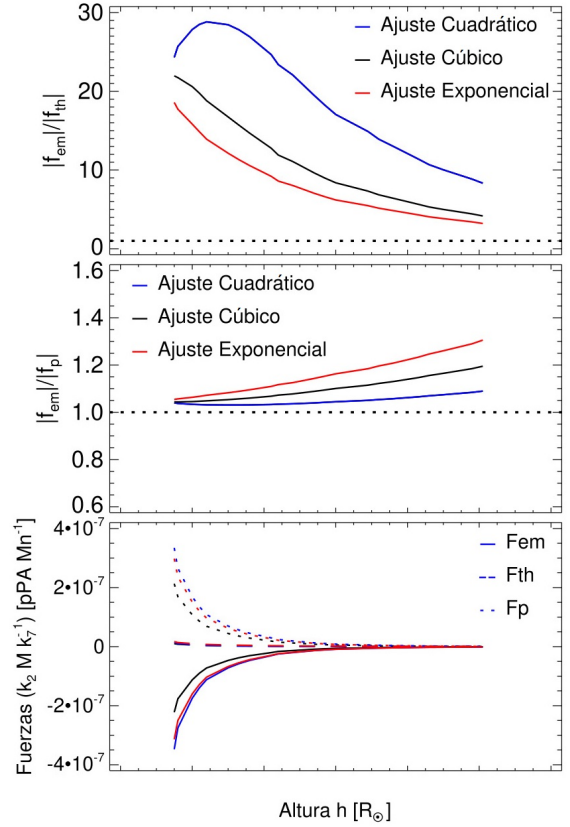


Figura 5: Resultados del modelo FRIS. *Superior*: razón entre el valor absoluto de las fuerzas de Lorentz y térmica vs. altura. *Centro*: razón entre el valor absoluto de las fuerzas de Lorentz y centrífuga. *Inferior*: Valores relativos de las fuerzas obtenidas.

de las diferentes fuerzas, encontramos un límite superior para  $f_{em}/f_{th}$  al considerar aceleración constante (ajuste cuadrático) y un límite inferior cuando la aceleración se supone variable en el tiempo a partir del ajuste exponencial. Lo opuesto ocurre para el caso de  $f_{em}/f_p$ .

A futuro, esperamos mejorar el modelo FRIS, intentando determinar las constantes desconocidas para obtener valores absolutos que nos permitan realizar extrapolaciones teóricas a 1 UA, para comparar los resultados obtenidos en la corona con los medidos por instrumentos *in situ*. Asimismo, se contemplará modificar las ecuaciones para incluir cambios en la masa y densidad.

*Agradecimientos*: LDL es becario doctoral y HC miembro de la CIC de CONICET. Los autores agradecen: a la AAA y editores de su boletín, al árbitro/a por sus constructivos comentarios, y al proyecto UTI4915TC (UTN). Los autores reconocen el uso de datos de STEREO (NASA), SOHO (ESA-NASA) y Wind (NASA).

#### Referencias

- Bein B.M., et al., 2013, ApJ, 768, 31  
 Holzknecht L., et al., 2018, CEAB, 42, 3  
 Liu Y., et al., 2006, JGR, 111, A12S03  
 Mishra W., Wang Y., 2018, ApJ, 865, 50  
 Thernisien A., 2011, ApJS, 194, 33  
 Vourlidas A., et al., 2010, ApJ, 722, 1522