

Modelado de líneas espectrales: una exploración hidrodinámica en estrellas supergigantes B

M.C. Fernandez¹, L.S. Cidale^{1,2}, R.O.J. Venero^{1,2}, M. Curé³ & I. Araya⁴

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

³ Instituto de Física y Astronomía, Facultad de Ciencias, Universidad de Valparaíso, Chile

⁴ Centro Multidisciplinario de Física, Vicerrectoría de investigación, Universidad Mayor, Chile

Received: 15 November 2025 / Accepted: 23 January 2026

©The Authors 2026

Resumen / Las estrellas supergigantes B presentan vientos estelares impulsados por radiación, cuyo modelado puede ser testeado mediante el cálculo de perfiles sintéticos. En este trabajo, se modela la hidrodinámica del viento estelar mediante el código dependiente del tiempo ZEUS-3D para resolver la ecuación de movimiento siguiendo su evolución temporal, en el formalismo de la teoría CAK modificada. Luego se resuelve la ecuación de transporte de radiación para medios en movimiento, fuera de equilibrio termodinámico local, para obtener perfiles de línea sintéticos de iones relevantes en estas estrellas tales como He I y Si IV. De esta manera, a partir de distintas leyes de velocidad —incluyendo nuevas soluciones hidrodinámicas halladas recientemente en la región de transición entre soluciones rápidas y lentas— se analiza la morfología de las líneas y su capacidad diagnóstica. Este análisis permite indagar los mecanismos de pérdida de masa en estas estrellas, un proceso clave que influye en su evolución posterior.

Abstract / B supergiant stars exhibit radiation-driven stellar winds, whose modelling can be tested by computing synthetic line profiles. The hydrodynamics of the stellar atmosphere is modelled with the time-dependent code ZEUS-3D, which solves the equation of motion and follows its temporal evolution within the framework of the modified CAK theory. We then solve the radiative transfer equation for moving media under non-local thermodynamic equilibrium to obtain synthetic profiles of key ionic ions, such as He I and Si IV. By exploring different velocity laws —including recently identified hydrodynamic solutions in the transition region between fast and slow regimes— we examine the resulting line morphologies and their potential diagnostic. This analysis provides new insight into the mass-loss mechanisms of B supergiants, a fundamental process that shapes their subsequent evolution.

Keywords / hydrodynamics — stars: early-type — stars: mass-loss — stars: winds, outflows

1. Introducción

Los vientos de las estrellas masivas desempeñan un papel clave en su evolución dado que, a través de los mismos, pueden perder cantidades significativas de masa. Además, estos interactúan con el entorno e incorporan elementos sintetizados al medio interestelar. En este trabajo estudiamos los vientos impulsados por radiación de las estrellas masivas siguiendo la formulación de la teoría mCAK (Pauldrach et al., 1986; Friend & Abbott, 1986), basada en Castor et al. (1975). Al resolver la ecuación de conservación de momento, la aceleración de radiación debida a las líneas se parametriza mediante tres parámetros: α , δ y k .

Dependiendo de los valores adoptados para los parámetros de la fuerza de radiación y para la tasa de rotación Ω^* , la teoría predice tres tipos de soluciones: rápidas, δ -lentas y Ω -lentas (Curé & Araya, 2023). Nuestro enfoque consiste en analizar las soluciones hidrodinámicas resultantes de considerar diversos valores

de los parámetros mencionados. De esta manera, los parámetros del viento (la tasa de pérdida de masa $\dot{M}$ y la velocidad terminal v_∞) son resultado directo de la integración de la ecuación de momento, determinados por los parámetros físicos adoptados para la estrella y para la fuerza de radiación. Una aproximación que se suele emplear para modelar el viento de las supergigantes B consiste en describir el perfil de velocidades del viento mediante la “ley β ”, que depende del parámetro β , cuyo valor debería estar entre 0.5 y 1 para estos objetos. Pero usualmente se lo considera como un parámetro libre, y se emplean valores mayores, del orden de 2 o 3, donde la aproximación no es válida. Además, con ese enfoque los parámetros del viento también son parámetros libres, generando incertezas en su determinación.

El espacio de parámetros de la fuerza de radiación fue estudiado por Venero et al. (2016) (y posteriormente en Venero et al., 2024), quienes encontraron que las soluciones rápidas y δ -lentas se separan por un intervalo en δ donde no se alcanza la convergencia, con el código hidrodinámico Hydwind (Curé, 2004). En un trabajo previo (Fernandez et al., 2024) identificamos soluciones den-

*Cociente entre la velocidad de rotación y la velocidad de rotación crítica en el ecuador.

tro de dicha región empleando el código ZEUS-3D (Clarke, 1996, 2010) que resuelve la ecuación de conservación de momento dependiente del tiempo, metodología que retomamos y ampliamos en este estudio, incorporando además la variación de la tasa de rotación.

Para obtener observables, calculamos el transporte de radiación utilizando las soluciones hidrodinámicas resultantes. Este cálculo se realiza para una atmósfera en expansión, considerando simetría esférica, en el marco comóvil. En el trabajo previo (Fernandez et al., 2024) calculamos el doblete de Si IV en la región del ultravioleta (UV). En esta ocasión, implementamos por primera vez el modelado del átomo de He I, que nos permite calcular líneas tanto en el óptico como en el infrarrojo (IR).

El trabajo se organiza de la siguiente forma: en la Sección 2 se describe la hidrodinámica del viento; en la Sección 3, el transporte de radiación y el modelado del He I; en la Sección 4 se presentan los resultados; y en la Sección 5 se resumen las conclusiones.

2. Soluciones hidrodinámicas de la teoría mCAK

En esta sección describimos brevemente la teoría mCAK y las soluciones hidrodinámicas que predice. El detalle completo de las ecuaciones puede consultarse, por ejemplo, en (Fernandez et al., 2024) y en el artículo de revisión de Curé & Araya (2023). Para obtener la ley de velocidad que describe el movimiento de las partículas que forman el viento estelar, se plantean las ecuaciones de conservación de masa y de momento. La teoría mCAK parametriza la aceleración de radiación debida a las líneas espectrales, mediante los parámetros de la fuerza de radiación α , k y δ , este último asociado a los cambios de ionización a lo largo del viento. En este trabajo adoptamos distintos valores para estos parámetros y analizamos las soluciones obtenidas. Un código ampliamente utilizado para resolver este problema es HYDWIND, que considera simetría esférica y estado estacionario. Con este enfoque se obtienen tres familias de soluciones:

- Soluciones rápidas: surgen para tasas de rotación bajas ($\Omega \lesssim 0.75$) y cambios mínimos en la ionización del viento ($\delta \lesssim 0.2$). Se corresponden con las soluciones clásicas (Pauldrach et al., 1986; Friend & Abbott, 1986), y presentan velocidades terminales altas.
- Soluciones Ω -lentas: aparecen para tasas de rotación altas ($\Omega \gtrsim 0.75$) y predicen velocidades terminales menores (Curé, 2004).
- Soluciones δ -lentas: se obtienen para valores altos del parámetro δ (usualmente $\delta \gtrsim 0.24$) y también presentan velocidades terminales bajas (Curé et al., 2011).

Dado que las estrellas supergigantes B son rotadores lentos, restringimos nuestro análisis a $\Omega \leq 0.5$, por lo que solo consideramos soluciones rápidas y δ -lentas. Venero et al. (2016) exploraron el espacio de parámetros de la fuerza de radiación utilizando el código HYDWIND, y encontraron que ambas familias de soluciones están se-

paradas entre sí, por una región donde no se logra la convergencia. Esta región, llamada inicialmente brecha, fue analizada en un trabajo previo (Fernandez et al., 2024), donde empleamos el código ZEUS-3D y encontramos soluciones estacionarias dentro de dicha región para un modelo representativo de una estrella supergigante B. A diferencia de HYDWIND, ZEUS-3D resuelve la ecuación de conservación de momento en su forma dependiente del tiempo (adaptación de Araya et al., 2018). Aunque también considera simetría esférica, emplea un método numérico distinto, que no presenta problemas de convergencia en la región de la brecha. De esta manera, adoptando valores para los parámetros estelares y de la fuerza de radiación, obtenemos la solución hidrodinámica correspondiente junto con los parámetros del viento.

3. Transporte de radiación

Para evaluar los modelos hidrodinámicos descriptos en la sección anterior, resolvemos el transporte de radiación en una atmósfera en expansión con simetría esférica, fuera del equilibrio termodinámico local y en estado estacionario, utilizando el marco de referencia del fluido (siguiendo el trabajo de Mihalas & Kunasz, 1978). Esto requiere resolver de forma iterativa las ecuaciones de equilibrio estadístico y de transporte. Empleamos el código MULTAS (*MULTI Line Transfer for Active Stars*, Venero et al., 2000) que modela el átomo de Si IV (considerando 6 niveles más el continuo), y permite calcular su doblete UV. Como aporte novedoso, en este trabajo incorporamos el átomo de He I. Dada su estructura electrónica que consiste de niveles singletes y tripletes, consideramos 23 niveles de energía ligados en total más el continuo. Para eso, recopilamos datos sobre los niveles de energía y las intensidades de oscilador de las transiciones permitidas, tomadas de la base de datos NIST (Kramida et al., 2024). Además, incluimos en el código las tasas colisionales (ligado-ligado y ligado-libre) y las secciones eficaces radiativas para el He I, en particular para los niveles considerados (obtenidas de Rohrmann, 2001). De esta manera, podemos calcular líneas en el óptico y en el IR de He I, además de las líneas UV de Si IV, permitiendo un modelado del viento simultáneo en diferentes rangos espectrales.

4. Resultados

Tomamos el modelo T19 de Venero et al. (2016), con $T_{\text{eff}} = 19000$ K, $\log g = 2.5$, $R = 40 R_{\odot}$, $\alpha = 0.5$ y $k = 0.32$. Variamos el parámetro δ para obtener soluciones rápidas, δ -lentas, y las correspondientes a la región de transición del viento, considerando distintas tasas de rotación Ω .

4.1. Soluciones hidrodinámicas

En la Fig. 1 se muestran los valores encontrados para los parámetros del viento en función del parámetro δ , para $\Omega = 0.1, 0.3$ y 0.5 . Los puntos llenos representan soluciones rápidas y δ -lentas, mientras que los círculos

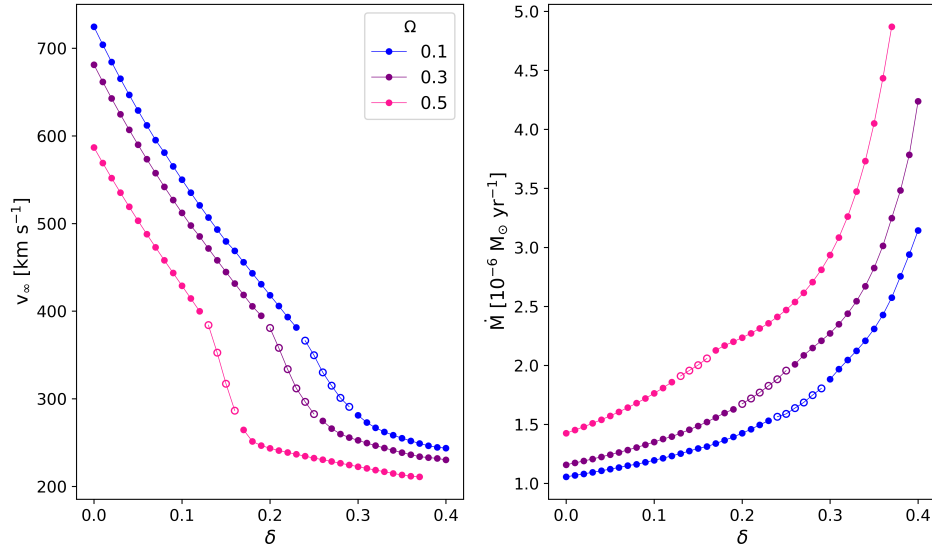


Fig. 1. Velocidad terminal (panel izquierdo) y tasa de pérdida de masa (panel derecho), en función del parámetro δ ($0 \leq \delta \leq 0.4$, $\Delta\delta = 0.01$), para diferentes tasas de rotación Ω (0.1, 0.3 y 0.5), para el modelo T19.

vacíos representan soluciones de la región de transición. Para cada Ω , δ varía entre 0 y 0.4 con paso 0.01. Se puede ver que los parámetros del viento predichos por la teoría mCAK resultan continuos entre los distintos regímenes, y la brecha reportada por Venero et al. (2016) desaparece.

En la Fig. 2 se presentan las soluciones hidrodinámicas para $\Omega = 0.1$ y 0.5. Aunque las soluciones para $\Omega = 0.1$ y 0.3 son muy parecidas, la rotación alta introduce diferencias claras en el caso $\Omega = 0.5$. Las soluciones representadas están calculadas para el mismo conjunto de valores de δ que la figura anterior. Es notable que, si bien las soluciones se calculan con incrementos uniformes en δ ($\Delta\delta = 0.01$), las soluciones de la región de transición del viento aparecen más espaciadas entre sí que las demás, sobre todo para el caso de mayor rotación. Este tipo de soluciones inician de manera similar a las soluciones rápidas pero, a distancias mayores a la estrella se asemejan a las soluciones δ -lentas. Este comportamiento produce un cambio de pendiente, apareciendo un quiebre en la solución hidrodinámica. Es importante destacar que todas las soluciones presentadas son estables, incluso con el quiebre. Al aumentar el tiempo de integración en ZEUS-3D, las soluciones alcanzan un estado estacionario, manteniendo su forma en el tiempo. Por lo tanto, estos quiebres son estructuras estables, se vuelven más pronunciados al aumentar la velocidad de rotación, y su posición varía con el parámetro δ (más lejos de la estrella al disminuir δ).

4.2. Perfiles sintéticos

La Fig. 3 muestra los perfiles sintéticos de Si IV y He I para tres soluciones hidrodinámicas con $\Omega = 0$: una rápida ($\delta = 0.0$), una en la región de transición ($\delta = 0.26$) y una δ -lenta ($\delta = 0.35$). En la primera columna se ve la solución hidrodinámica, la segunda columna corresponde al perfil del doblete de Si IV ($\lambda\lambda 1394, 1403 \text{ \AA}$) obteni-

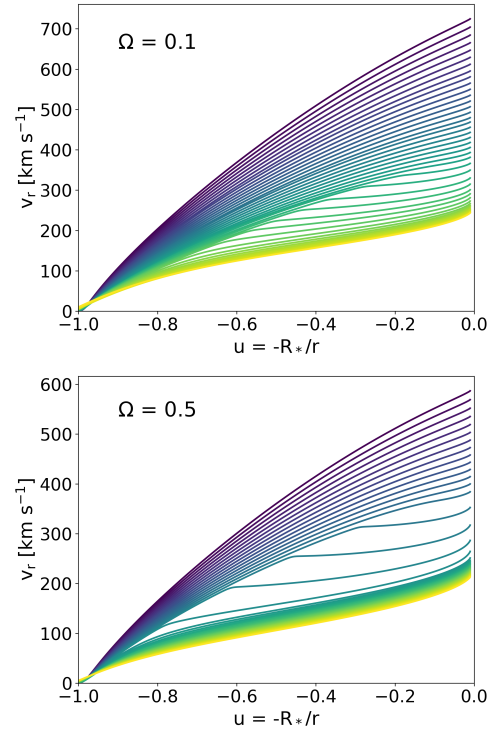


Fig. 2. Soluciones hidrodinámicas encontradas para el modelo T19 considerando $\Omega = 0.1$ (panel superior) y $\Omega = 0.5$ (panel inferior). Las distintas curvas representan distintos valores de δ ($0 \leq \delta \leq 0.4$, $\Delta\delta = 0.01$)

do, mientras que en las siguientes columnas se muestran los perfiles de He I calculados ($5876 \text{ \AA}$ y $4.04 \mu\text{m}$). Se puede observar que hay una transición suave de la morfología de los perfiles al pasar de un régimen al otro, porque la solución de la región de transición produce perfiles intermedios entre ambos regímenes. A su vez, es notable cómo el perfil de He I en $4.04 \mu\text{m}$ evoluciona

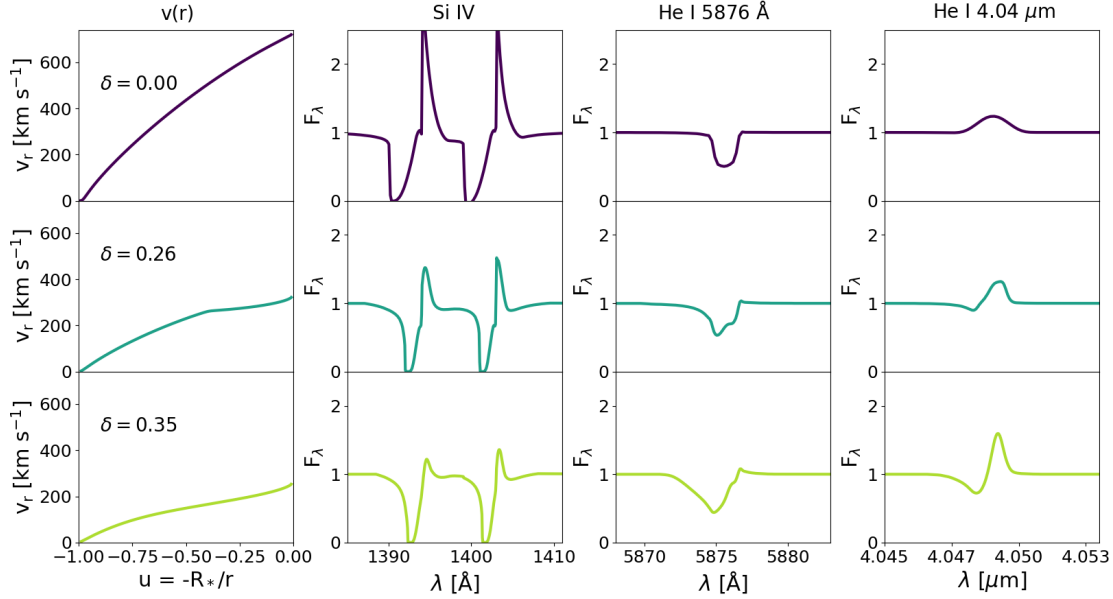


Fig. 3. Perfiles sintéticos calculados para tres soluciones hidrodinámicas: rápida (primera fila), en la región de transición (segunda fila), y δ -lenta (tercera fila). En la primera columna se muestran las soluciones hidrodinámicas, y en las siguientes, los perfiles obtenidos para Si IV (2da columna), He I 5876 Å (3era columna) y He I 4.04 μm (4ta columna). La solución rápida tiene $\dot{M} = 1.06 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ y $v_{\infty} = 720 \text{ km s}^{-1}$, la solución de la transición tiene $\dot{M} = 1.67 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ y $v_{\infty} = 322 \text{ km s}^{-1}$, mientras que la solución δ -lenta tiene $\dot{M} = 2.35 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ y $v_{\infty} = 253 \text{ km s}^{-1}$.

desde pura emisión hacia un perfil P Cygni. Eso sugiere que es posible caracterizar el viento de una estrella mediante un ajuste espectral adecuado.

5. Conclusiones

En este trabajo realizamos un modelado hidrodinámico de los vientos de estrellas masivas, en el marco de la teoría mCAK. Analizamos específicamente la región de transición entre soluciones rápidas y δ -lentas, y confirmamos que en esa región existen soluciones estacionarias. La particularidad de estas soluciones es que algunas presentan un quiebre (cambio en la pendiente del perfil de velocidad), que se desplaza hacia regiones más externas al disminuir δ , y se vuelve más pronunciado al aumentar la rotación de la estrella.

Como resultado distintivo, incorporamos por primera vez el modelado del átomo de He I en el cálculo del transporte de radiación en medios en movimiento. Esto nos permitió obtener perfiles sintéticos en el óptico e infrarrojo, además del doblete ultravioleta de Si IV. Los perfiles asociados a las soluciones de transición muestran morfologías intermedias entre los regímenes rápido y δ -lento, lo que refuerza la interpretación de que la transición hidrodinámica es continua y se refleja de manera directa en el espectro emergente.

El objetivo a futuro es realizar un ajuste multifrecuencia de los espectros observados de estrellas supergigantes B, utilizando simultáneamente líneas en el UV, óptico e IR, a fin de determinar con precisión los parámetros del viento y establecer en qué régimen hidrodinámico se encuentra cada estrella.

Agradecimientos: MCF, LSC y ROJV agradecen el apoyo financiero de CONICET (PIP 11220200101337CO) y UNLP (Programa de Incentivos 11/G192). ROJV al PI 11/G193. IA y MC agradecen al apoyo del proyecto FONDECYT 1230131. Este proyecto recibió financiamiento de la Unión Europea en el marco del “Programme for Research and Innovation Horizon 2020 (2014–2020) under the Marie Skłodowska-Curie Grant No. 101183150 - OCEANS”.

Referencias

- Araya I., et al., 2018, MNRAS, 477, 755
- Castor J.I., Abbott D.C., Klein R.I., 1975, ApJ, 195, 157
- Clarke D.A., 1996, ApJ, 457, 291
- Clarke D.A., 2010, ApJS, 187, 119
- Curé M., 2004, ApJ, 614, 929
- Curé M., Araya I., 2023, Galaxies, 11, 68
- Curé M., Cidale L., Granada A., 2011, ApJ, 737, 18
- Fernandez M.C., et al., 2024, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina, 65, 79
- Friend D.B., Abbott D.C., 1986, ApJ, 311, 701
- Kramida A., et al., 2024, Nist atomic spectra database (ver. 5.11), <https://physics.nist.gov/asd>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- Mihalas D., Kunasz P.B., 1978, ApJ, 219, 635
- Pauldrach A., Puls J., Kudritzki R.P., 1986, A&A, 164, 86
- Rohrmann R., 2001, *Estudio de las líneas del He I originadas en niveles metaestables*, Ph.D. thesis, National University of La Plata, Argentina
- Venero R., Cidale L., Ringuelet A., 2000, M.A. Smith, H.F. Henrichs, J. Fabregat (Eds.), *IAU Colloq. 175: The Be Phenomenon in Early-Type Stars*, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 214, 607
- Venero R.O.J., et al., 2016, ApJ, 822, 28
- Venero R.O.J., et al., 2024, MNRAS, 527, 93