

Análisis de los datos de velocidad radial y tránsito del sistema exoplanetario múltiple 55 Cnc y de su habitabilidad

Camilo Ospinal^{1,*}

¹ Instituto de Física, Universidad de Antioquia U de A, calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia

*camilo.ospinal@udea.edu.co

RESUMEN

55 Cancri o 55 Cnc representa uno de los sistemas exoplanetarios de mayor interés para la comunidad científica, es un sistema binario de dos estrellas de secuencia principal a 41 años luz de distancia en la constelación de Cáncer, donde 55 Cnc es una enana amarilla de tamaño y masa similares al Sol que alberga 5 exoplanetas confirmados hasta el momento, 55 Cnc e, b, c, f y d, del cual 55 Cnc e ha sido el más estudiado debido a sus peculiares características orbitales, puesto que es una Súper Tierra que solo tiene un periodo de 0.7 días también llamado mundo de lava. Pese a que el sistema es muy reconocido, poco sabemos acerca de los otros 4 planetas que lo conforman. En este artículo se realiza un análisis de los datos de velocidad radial y tránsito de 55 Cnc, se grafican las curvas de velocidad radial para cada uno de los planetas, permitiendo encontrar sus masas, todas en el rango de masas confirmadas, también se grafica la curva de tránsito y se encuentran los radios de los planetas, de los cuales el radio de 55 Cnc e muestra mejor correlación. Además se hace un análisis de las zonas de habitabilidad del sistema, distinguiendo cada uno de los casos propuestos por Kopparapu et al. (2013), encontrando que el gigante gaseoso 55 Cnc f es el único que se encuentra en la zona habitable, en una posición y condiciones muy similares a las de la Tierra, lo que permitiría albergar lunas que contengan agua en estado líquido y la posibilidad de vida.

Keywords: 55 Cancri, velocidad radial, tránsito, habitabilidad, sistemas múltiples

1 INTRODUCCIÓN

Es difícil imaginar una idea más apasionante y cautivadora que la posible existencia de otros mundos más allá del nuestro, saber que vivimos en un sistema compuesto de 8 cuerpos principales, incluyendo a la Tierra, tan variados y distintos a nuestro hogar, que habitan este vecindario tan cerca del Sol, con rotaciones peculiares y días inimaginables como Mercurio, además de atmósferas extremadamente densas y de compuestos que para la vida en la Tierra serían imposibles de respirar a tales concentraciones, a saber, Venus; superficies óxidadas y tormentas tan bastas que cubren la totalidad del planeta, con nubes de dióxido de carbono y montes más altos que cualquiera que hallamos caminado como especie: Marte. Suelos prácticamente inexistentes debido a su inmensurable profundidad, donde los fluidos gobiernan el paisaje, interactuando entre sí, redistribuyendo la energía turbulentamente, generando remolinos de cientos de años de antigüedad y vientos fortísimos que

destrozarían cualquier máquina creada por el humano: Júpiter. Colosos anillados con hexágonos en sus polos, de lunas frías, heladas, vulcanicas, mundos en sí mismas: Saturno. Solitarios puntos de enorme tamaño que demoran decenas de años en completar una vuelta al Sol, donde su gelidez haría, si más no faltara, llover riquezas solidas de carbono más que escasas en nuestra silicata corteza: Urano y Néptuno. Tantas son las posibilidades que solo un pequeño barrio, nacido de una nube de polvo interestelar, ubicado en una zona, a grandes rasgos, nada especial de una galaxia espiral, puede contener, que en un universo presumiblemente infinito como el nuestro, como no ha de esperarse encontrar, mirando a los cielos a cualquiera de esos puntos de plasma, otros mundos, otras Tierras, otra forma de vivir concebida por otra forma de vida. Ya decía Epicuro, en aquel tiempo de vivaces ideas, que "Hay infinitos mundos parecidos y diferentes a la Tierra... Debemos creer que en todos esos mundos hay criaturas vivientes y plantas y

otras cosas que nosotros vemos en este mundo” o ¿por qué no recordar, una vez más, las adelantadas palabras soñadoras de Giordano Bruno? Quién, parafraseando, se permitió decir con mucho riesgo, que allá afuera existen incontables soles que albergan incontables mundos. Para dicha de los nombrados y los muchos que no, sus fascinantes ideas lograron encontrarse ser realidad, en la segunda final del siglo XIX, y a finales de este, el sistema binario 70 Ophiuchi, fue visto con ojos de asombro al pensar que, entre estas dos estrellas, una compañera invicible mostraba cabida, un posible planeta, el primero se pensó, más el tiempo, que no lejano, y la investigación daría el contundente resultado de que se tendría que esperar un siglo después, y pasar por infames e incertados supuestos descubrimientos de exoplanetas, tales como el supuesto planeta de la estrella de Bernard en 1960 (van de Kamp, 1963), para que en 1996 se anunciara el descubrimiento del primer planeta orbitando una estrella similar al Sol, 51 Peg, un planeta de 0.5 masas de Júpiter (M_J), con un periodo de 4.5 días (Mayor and Queloz, 1995). El descubrimiento de 51 Peg fue un hito, una marca significativa, el antes y después para la búsqueda de los mundos que soñaron Epicuro, Bruno, Newton, Huygens y demás, y si llega el día en el que, en nuestra obsesión, respondamos bien sea no o bien sea sí, si nos encontramos solos en este universo, 51 Peg será el primer planeta que, además de los “nuestros”, apareció allá en el firmamento, para mostrarnos el camino.

Este artículo es un análisis a través de velocidad radial y tránsito del sistema exoplanetario 55 Cancri, también llamado 55 Cnc para abreviar, ubicado en la constelación de Cáncer. 55 Cnc es un sistema binario, compuesto de la estrella principal similar al Sol, una enana amarilla, la estrella secundaria es una enana roja a más de 1000 UA de distancia. En 55 Cnc habitan 5 exoplanetas, en orden de distancia 55 Cnc e (Janssen), 55 Cnc b (Galileo), 55 Cnc c (Brahe), 55 Cnc f (Harriot) y 55 Cnc d (Lippershey). En la Sección 2 se hace un pequeño recuento y explicación de las técnicas de detección: velocidad radial y tránsito. Posteriormente, en la Sección 3 se muestra la metodología a usar con el fin de encontrar las masas de los 5 exoplanetas, sus radios y su análisis de habitabilidad. En la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos y se compara con los datos disponibles en las referencias científicas, para finalmente, concluir y discutir acerca de este interesante vecindario planetario, en la Sección 5. El interés por 55 Cnc nace de ser uno de los sistemas exoplanetarios más estudiados gracias a 55 Cnc e, pese a esto, la estrella y sus residentes siguen teniendo muchos misterios por resolver, este artículo pretende ser un primer paso para un posible futuro estudio del sistema. Antes de continuar, el autor se permite comentar que este artículo se ha basado en buena parte en el libro *Exoplanets* de Sara Seager (2010), en los capítulos *Introduction to Exoplanets* de S. Seager y J. J. Lissauer, *Kleperian Orbits and Dynamics of Exoplanets* de C.D. Murray y A. C. M Correia, *Radial Velocity Techniques for Exoplanets* de C. Lovis y D. Fischer, y *Exoplanets Transits and Occultations* de J. N. Winn.

2 NUEVOS MUNDOS

2.1 Velocidad radial y tránsito

Responder si hay otros mundos como el nuestro, cuántos de ellos hay, como son sus formas, nos ha llevado a desarrollar técnicas para estudiar su dinámica, su formación, sus características físicas, su atmósfera. Desde la década de los 50', Struve (1952) propuso que planetas similares a Júpiter podrían ser detectados a 0.02 AU de su estrella madre, a través de la medición de la fuente de luz de la estrella se podría ver si esta presentaba un corrimiento al rojo o al azul, más allá de su intrínseco efecto Doppler debido a su movimiento a través de la galaxia. A esta técnica que se concentra en las variaciones de la longitud de onda de la luz de la estrella se la conoce como *velocidad radial*, que va a ser de principal interés en este artículo. Struve propuso que planetas de 10 veces la masa de Júpiter con órbitas muy cercanas a su estrella anfitriona, variarían la velocidad de esta alrededor de 2 km s^{-1} . Años más tarde Griffin y Griffin (1973) propusieron teóricamente una capacidad de detección de 10 m s^{-1} de la cual en 1979 G. Walker y B. Campbell lograron obtener una resolución de 15 m s^{-1} , de ahí, la sucesiva implementación de la técnica y el trabajo realizado con el espectrografo ELODIE, permitieron detectar a 51 Peg b. La velocidad radial permite calcular, principalmente, la masa del planeta, piense en que entre más macivo es un planeta, más fuerza gravitacional ejerce sobre la estrella, haciendo que el centro de masas se desplace hacia fuera de esta, permitiendo que orbite sobre él. La distancia a la que se encuentre el planeta también es otro factor fundamental, entre más cerca esté, mayor el bamboleo. La forma de la órbita condiciona mucho el movimiento de la estrella, puesto que este no va a ser nunca totalmente periodico, es cercano cuando la excentricidad tiende a cero, sin embargo, para órbitas muy elípticas, la atracción gravitacional interviene de distinta manera según la posición. El alma de la técnica de velocidad radial se concentra en la ecuación de la semiamplitud de velocidad radial, que da cuenta de como es el comportamiento sinoidal de esta, en la Sección 3 se presenta una variante de esta ecuación, que permite calcular la masa mínima de un planeta, que en términos sencillos, nace de considerar que al observar el corrimiento al rojo de la estrella a causa de un planeta, no tenemos seguridad de cuál es la inclinación de su órbita respecto a nosotros, si la órbita no tiene inclinación alguna, el movimiento de la estrella es totalmente perpendicular a nuestro plano y la masa real es la masa mínima, si hay inclinación, la velocidad radial tiene componentes en otra coordenada.

Luego de haber desarrollado la técnica de velocidad radial, a inicios de los 2000 ya se estaba trabajando en un nuevo método de detección de exoplanetas, este método al que se le puede llamar *técnica de detección por tránsito* aprovecha las propiedades geométricas y ópticas del sistema. Su base radica en el funcionamiento de los eclipses, al igual que la Luna tiene un tiempo de tránsito cuando ocurre un eclipse, es decir, el tiempo que tarda en entrar y salir de la conjunción con el Sol, los exoplanetas realizan lo mismo para un observador en la Tierra. Cuando ocurre un tránsito la cantidad de luz que es percibida disminuye a causa de que el planeta la intercepta, entre más

Constant	Recent Venus	Runaway Greenhouse	Moist Greenhouse	Maximum Greenhouse	Early Mars
$S_{\text{eff } \odot}$	1,7763	1,0385	1,0146	0,3507	0,3207
a	$1,4335 \times 10^{-4}$	$1,2456 \times 10^{-4}$	$8,1884 \times 10^{-5}$	$5,9578 \times 10^{-5}$	$5,4471 \times 10^{-5}$
b	$3,3954 \times 10^{-9}$	$1,4612 \times 10^{-8}$	$1,9394 \times 10^{-9}$	$1,6707 \times 10^{-9}$	$1,5275 \times 10^{-9}$
c	$-7,6364 \times 10^{-12}$	$-7,6345 \times 10^{-12}$	$-4,3618 \times 10^{-12}$	$-3,0058 \times 10^{-12}$	$-2,1709 \times 10^{-12}$
d	$-1,1950 \times 10^{-15}$	$-1,7511 \times 10^{-15}$	$-6,8260 \times 10^{-16}$	$-5,1925 \times 10^{-16}$	$-3,8282 \times 10^{-16}$

Table 1. Coeficientes para calcular flujos estelares habitables y sus correspondientes zonas para estrellas con $2600 \text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 7200 \text{ K}$

macivo sea el planeta y más cerca esté de su estrella, mayor es la cantidad de flujo que tapa. El método de detección por tránsito tiene una amplia variedad de ecuaciones y relaciones que permiten el cálculo de distintos parámetros, en la Sección 3 se aplican algunas de ellas. Cabe resaltar que también se puede estudiar el fenómeno del tránsito por ocultación, es decir, cuando el planeta pasa detrás de la estrella y queda oculto, en este caso la cantidad de luz que se percibe aumenta gracias al albedo del planeta. El método de velocidad radial resulta ser de mayor utilidad que la técnica de velocidad radial cuando el planeta está muy cerca de la estrella por las razones mencionadas anteriormente.

El preprocesado, procesamiento y postprocesamiento de cualquiera de los datos de velocidad radial o tránsito, son pasos muy importantes a la hora de detectar un exoplaneta. Desde el lanzamiento del telescopio espacial Kepler, la mayoría de confirmaciones de exoplanetas se realizaron en 2015, a partir de ahí, las confirmaciones disminuyeron considerablemente, hay otras misiones y telescopios en Tierra monitoreando y adquiriendo datos de estrellas, con el objetivo de seguir confirmando a los posibles objetos de interés, sin embargo, la explicación de este hueco de confirmaciones se debe a la dificultad que implica analizar los datos de una estrella. Hay muchas cosas que pueden ser ruido en una toma de datos astronómica, errores en el instrumento, la contaminación de la atmósfera, hablando más acerca de la estrella, hay que saber diferenciar entre los movimientos propios de esta a través de la galaxia, si es que el sistema es binario esto aumenta más factores que deben ser considerados, el polvo cósmico también es capaz de interceptar muchas de las longitudes de onda provenientes de la estrella, patrones que pueden ser muy irregulares, además, la propia estrella cuenta con ciclos naturales sobre su superficie que afectan a la velocidad radial, si a esto le sumamos que, cuando recibimos los datos brutos, no se sabe siquiera si hay un planeta, dos o muchos, se logra entender la complejidad del asunto, por lo que no es de asombrarse que un primer procesamiento de los datos, que podríamos considerar mejor como un preprocesamiento, no den los resultados esperados. Es más, de una vez debemos afirmar que, para un sistema tan complicado como lo es 55 Cnc, que cuenta con dos estrellas y 5 exoplanetas, si no es que más, los resultados que se encuentren variarán mucho de los reportados. Sería así, entonces, que nuestro procesamiento de datos arroje valores similares a aquellos de los autores. Para nuestra fortuna, así fue, como podrá ver en la Sección 4 de resultados.

2.2 Habitabilidad

James Kasting fue el primero en hacer un modelo que describiera las condiciones astronómicas con las que debería contar un planeta para ostentar agua líquida y, por ende, la posibilidad de vida. Su planteamiento inicial se basó en estudiar planetas alrededor de estrellas de secuencia principal, que sean de tipo terrestre y su composición atmosférica sea similar. Él tuvo en cuenta que la fotodisociación y las altas temperaturas de la estrella marcarían un límite interno en el sistema, mientras que la lejanía y las bajas temperaturas uno externo. Se considera, además, que la zona de habitabilidad cambia con el tiempo, puesto que la evolución de la estrella hace que incremente su luminosidad y, con ello, la cantidad de energía por segundo que recibe un planeta (Kasting et al., 1993). Kopparapu et al. (2013) actualizaron el modelo de Kasting para incluir a estrellas con temperaturas efectivas de entre 2600 y 7200 K. Para los límites internos consideran a un Venus temprano (Early Venus) que pudo tener agua líquida en el pasado gracias a la poca luminosidad del Sol, también el efecto invernadero desbocado (Runaway greenhouse), donde la atmósfera de un planeta es tan densa y llena de gases que absorben en longitudes de onda corta, que la temperatura aumenta continuamente provocando la evaporación de los océanos, y el efecto invernadero "humedo" o mejor "Moist greenhouse", donde la temperatura evapora las fuentes hídricas, pero no en su totalidad. Para los límites externos se tiene en cuenta a un Marte temprano (Early Mars), que da señales de haber albergado agua líquida en su superficie hace 3.8 Ga, si bien el flujo proveniente del Sol era menor, podía sostener una atmósfera que permitía un efecto invernadero, también se considera el tope máximo del efecto invernadero, donde por las bajas temperaturas no puede haber agua líquida y toda está congelada. La distancia de los límites está dada por como llega la energía a estas zonas, es decir, por la luminosidad de la estrella y el flujo estelar efectivo:

$$d = \left(\frac{L/L_{\odot}}{S_{\text{eff}}} \right)^{1/2} [\text{AU}] \quad (1)$$

Donde d es la distancia, L la luminosidad de la estrella en unidades de luminosidad solar L_{\odot} y S_{eff} el flujo efectivo, parametrizable de la siguiente forma:

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}\odot} + aT_* + bT_*^2 + cT_*^3 + dT_*^4 \quad (2)$$

Con $T_* = T_{\text{eff}} - 5780 \text{ K}$ y T_{eff} la temperatura efectiva de la estrella tomada como un cuerpo negro (Kopparapu et al., 2013).

Las constantes dependen del caso que se estudie, del límite con el cual se está trabajando, estas constantes son plasmadas en la Tabla 1.

3 METODOLOGÍA

3.1 Radios y masas de los exoplanetas

Para obtener los datos de velocidad radial y tránsito de la estrella 55 Cnc se recurrió a NASA Exoplanet Archive. Se utilizaron los datos de velocidad radial de Howard y Fulton (2016), fueron obtenidos por la misión EXO-S, una misión espacial para el descubrimiento y la caracterización de exoplanetas que obtiene imágenes directas, diseñada para la búsqueda e identificación de planetas similares a la Tierra, el telescopio utilizado para el estudio es el WFIRST-AFTA (Wide-Field Infrared Survey Telescope Astrophysics Focused Telescope Asset), los instrumentos básicos son la cámara para exoplanetas, el espectrografo y una cámara guía (Seager et al., 2015). Para los datos de tránsito o fotometría, se descargaron los correspondientes a los catálogos HIPPARCOS y TYCHO, catálogos de astrometría y fotometría de la misión ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission (ESA, 1997), el satélite utilizó un telescopio Schmidt óptico totalmente reflectante (ESA, 2023). En la **Fig. 1** podrá ver las series de tiempo obtenidas con el graficador de NASA Exoplanet Archive.

Para el procesamiento de los datos se aprendió a utilizar y se construyó un código con *Exoplanet*, una herramienta escrita en Python y desarrollada activamente en un repositorio público en GitHub, sirve para modelados probabilísticos de datos de velocidad radial y tránsito de exoplanetas, así como otras series de tiempo astronómicas (<https://docs.exoplanet.codes/en/v0.4.5/>). La virtud destacable de *Exoplanet* respecto a otras librerías de disponibles es su capacidad de trabajar con datos de estrellas que hospedan más de un exoplaneta. Por lo general, las herramientas más básicas que procesan este tipo de datos utilizan un análisis estadístico sencillo con periodogramas para encontrar una rejilla de frecuencias que de cuenta de los efectos del planeta orbitando, sin embargo, cuando el sistema exoplanetario es múltiple, como 55 Cnc, estas no dan muy buenos resultados. En la **Fig. 2** se muestran los resultados de los periodogramas utilizando el pipeline de Mauricio Medina (**Fig. 2a**) y el NASA Exoplanet Periodogram Service (**Fig. 2b**). *Exoplanet* permite calcular la semi amplitud de la velocidad radial de distintos planetas a la vez, utilizando como parámetros el periodo y su error, y el tiempo de conjunción y su error. Puesto que los mejores métodos estadísticos que permiten el análisis de los datos brutos de la estrella para calcular los periodos están fuera de las capacidades e intereses de este artículo, ya que corresponden a estadística avanzada, se utilizaron los parámetros que han encontrado diversos autores en los últimos años (ver Tabla 2). Para encontrar la masa y excentricidad de cada uno de los exoplanetas, se realizaron modificaciones al pipeline de Mauricio Medina, pero se tomaron los datos de excentricidad reportados en NASA Exoplanet Archive, puesto que, como habíamos

mencionado, el código de Mauricio Medina solo permite el proceso con un sistema de solo un exoplaneta. El código que se modificó también implementa la ecuación de masa mínima (ecuación 3) para el cálculo, junto al código utilizando *Exoplanet*.

$$M_p \sin i = \frac{K \sqrt{1-e^2}}{28.4329 \text{ m s}^{-1}} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)^{2/3} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Donde M_p es la masa del planeta en unidades de masas de Júpiter, i es el ángulo de inclinación del sistema, K_s la semiamplitud de velocidad radial, e la excentricidad de la órbita, M_* la masa de la estrella y P el periodo orbital. Para calcular el radio

Exoplaneta	P [días]	ΔP	T_c [días]	ΔT_c
55 Cnc e ^a	0.7365474	1.3×10^{-7}	2230.2096	6×10^{-4}
55 Cnc b ^{a, b}	14.6516	1×10^{-4}	970.293	0.014
55 Cnc c ^{a, b}	44.3989	0.0043	1013.83	0.43
55 Cnc f ^{a, b}	259.88	0.29	1187.7	5.2
55 Cnc d ^{a, b}	5574.2	93.8	957	120

Table 2. Periodo (P) y tiempo de conjunción (T_c) con sus respectivos errores.

^a Bourrier et al. 2018

^b Rosenthal et al. 2021

del planeta es usual utilizar la ecuación de profundidad de tránsito

$$\delta = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Que da cuenta de el porcentaje de luz disminuida a partir del paso de un planeta frente a la estrella. Es útil cuando solo se tiene un exoplaneta huesped. Aquí, al tener 5 exoplanetas, se manipuló la ecuación 16 de Seager y Mallén-Ornelas (2003), para obtener:

$$R_p = \sqrt{\left(\frac{\pi a t_T}{P} \right)^2 - (a \cos i)^2} - R_* \quad (4)$$

Donde R_p es el radio del planeta, a el semieje mayor, t_T el tiempo de tránsito y R_* el radio de la estrella. a se calcula con la ecuación 5 y $a \cos i$ a partir de la ecuación 6, que corresponde a la ecuación 7 de Winn (2010). Para t_T se utilizó la ecuación 16 de Seager y Mallén-Ornelas (2003) con la suposición de que el radio del planeta era muy pequeño comparado con la estrella.

$$a = \left(\frac{GM_* P^2}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$b = \frac{a \cos i}{R_*} \left(\frac{1-e^2}{1+e \sin \omega} \right) \quad (6)$$

b es el parámetro de impacto y ω es el argumento del periastro, el único planeta que cuenta con b es 55 Cnc e, no se encontró una ecuación que, con los datos útiles, permitiera encontrar b de manera sencilla, por lo tanto, para los restantes, se aprovechó el hecho de que se sabe que los planetas son aproximadamente coplanares (Fischer et al., 2007), por lo tanto, $\cos i$ se tomó como el mismo para todos y como $i \sim 90^\circ$ el segundo término de la

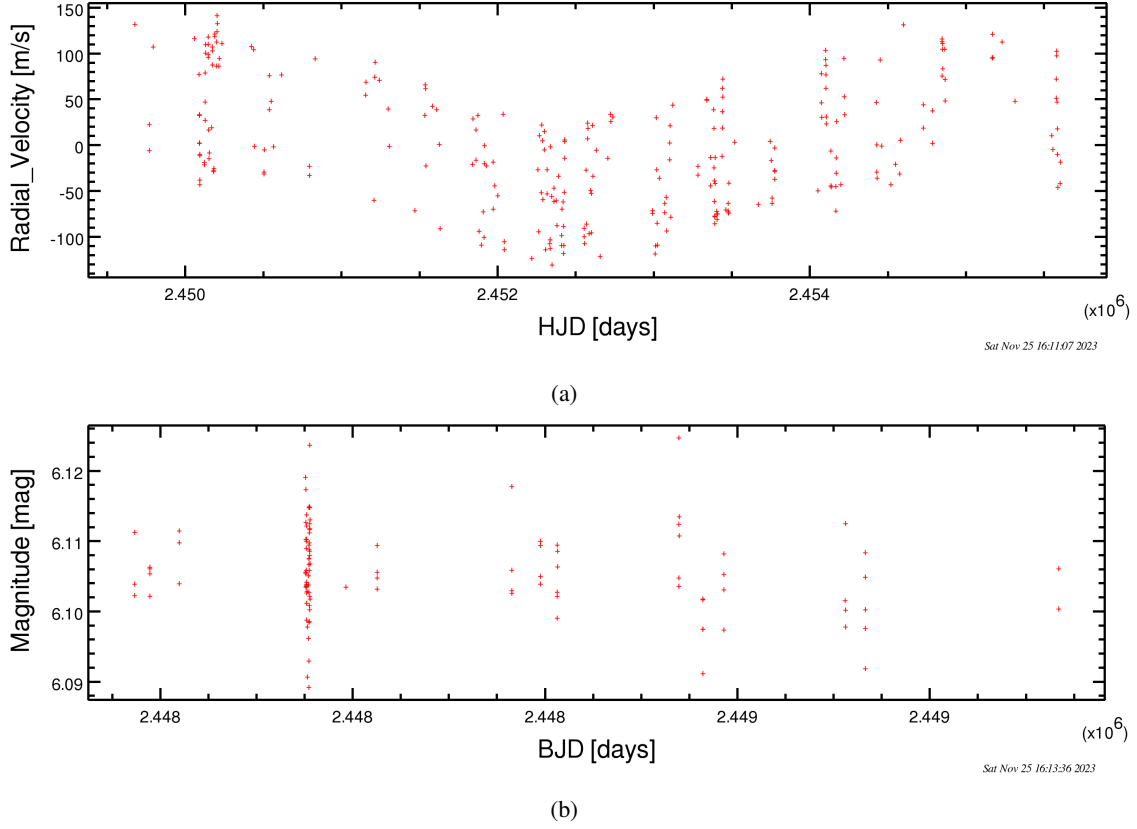


Fig. 1. Series de tiempo de (a) velocidad radial y (b) fotometría para el sistema exoplanetario 55 Cnc.

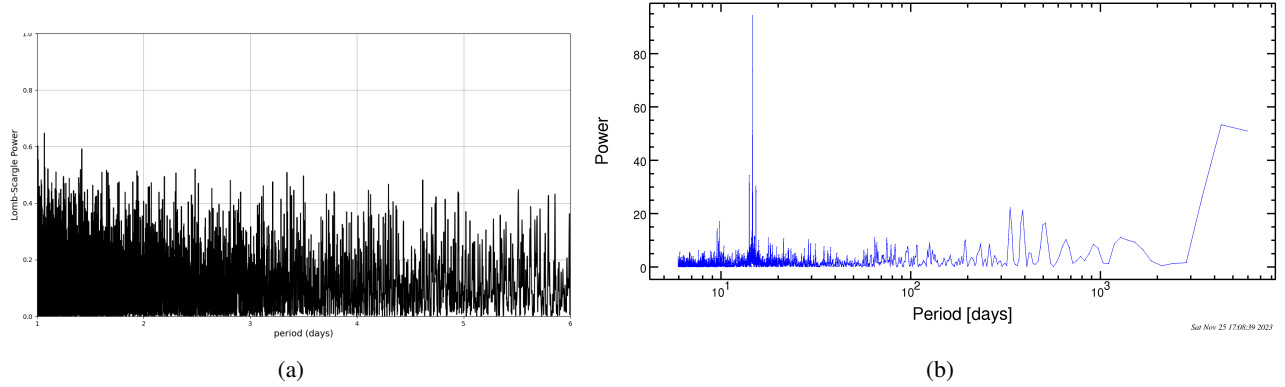


Fig. 2. Periodogramas de velocidad radial de 55 Cnc obtenidos con dos distintas herramientas. (a) El pipeline de Mauricio Medina, disponible en GitHub, (ver Referencias), no mostró ninguna frecuencia reconocible que diera indicios de un exoplaneta en 55 Cnc, el pipeline utiliza una versión rápida del método Lomb-Scargle, lo que explica este deficiente resultado para sistemas múltiples. (b) El NASA Exoplanet Periodogram Service muestra una frecuencia totalmente reconocible, para un periodo de 14.65 días, este corresponde al periodo orbital de 55 Cnc b, la segunda mejor frecuencia da un periodo de 4345.97 días, que está muy cerca al periodo orbital de 55 Cnc d (ver Sección 3), no obstante, ninguna otra de las 3 siguientes frecuencias dan resultados que coincidan con los reportados para los otros exoplanetas.

ecuación 1 se anula para ellos. Una vez obtenidos los radios de cada uno de los exoplanetas, se usó el Colab de *Planet Hunters* para producir sus curvas de tránsito (ver Fig ??).

3.2 Modelo de evolución estelar para habitabilidad

Para la habitabilidad es primordial contar con un buen modelo que relacione la luminosidad con la masa de la estrella, en este artículo se usó el modelo de Kroupa et al. (1990) para estrellas de masas entre $0.09M_{\odot}$ y $1.0M_{\odot}$.

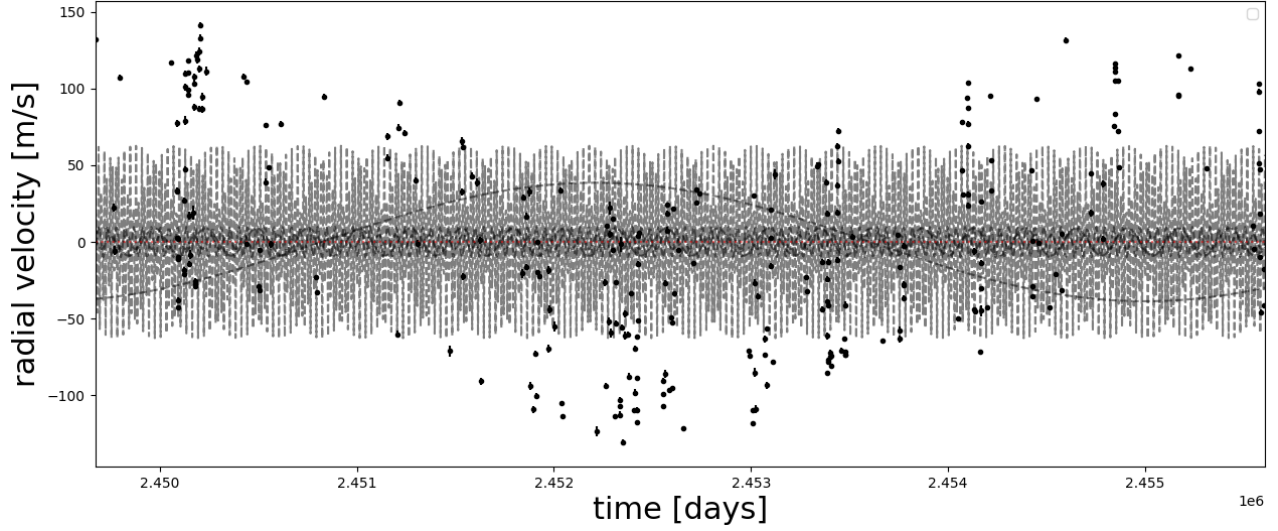


Fig. 3. Curvas de velocidades radiales para el sistema 55 Cnc junto a la serie de tiempo sobre el *background* (Línea roja). La curva más sombreada de alta frecuencia corresponde a 55 Cnc b con un periodo de 14.65 días. La curva de baja frecuencia a 55 Cnc d con un periodo de 5574.2 días. Las curvas más pequeñas corresponden a 55 Cnc e, c y f con periodos de 0.73, 44.39 y 259.88 días respectivamente. La intensidad de la velocidad radial da cuenta del efecto del planeta sobre la estrella, cuanto mayor, más macivo el planeta.

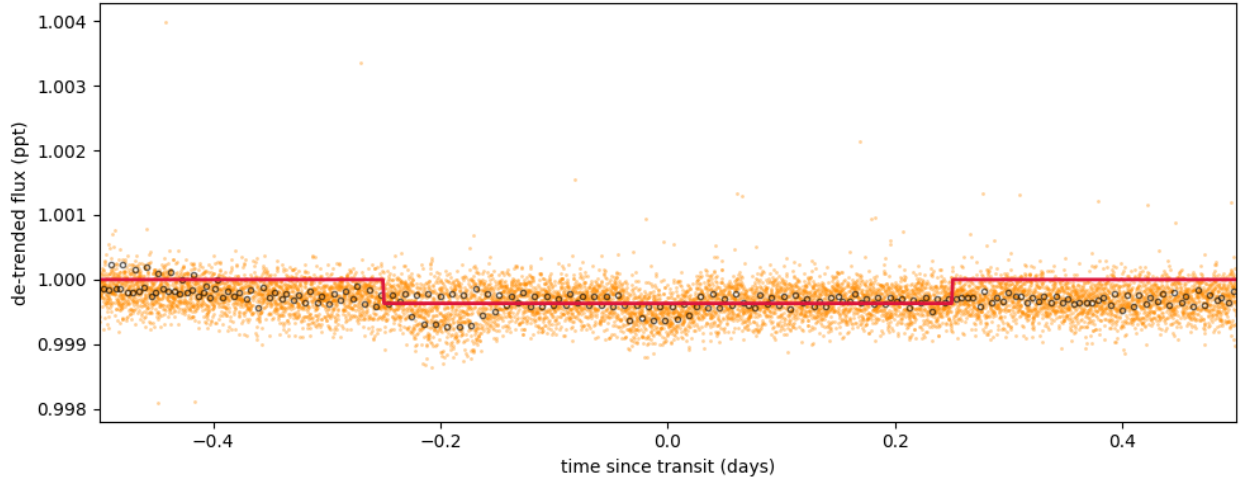


Fig. 4. Curva de fotometría procesada de 55 Cnc.

$$L = \frac{0.1400M_*^2 + 46.81M_*^9}{2.395 \times 10^{-10}M_*^{-9} + 1 + 57.99M_*^{4.5}} L_\odot \quad (7)$$

Donde M_* es la masa de la estrella y L_\odot la luminosidad solar como se mencionó en la Sección 2. Utilizando la ecuación de la temperatura efectiva,

$$T_{eff} = \left(\frac{L}{\sigma 4\pi R_*^2} \right) \quad (8)$$

Se calcularán las zonas de habitabilidad para 55 Cnc.

4 RESULTADOS

En el primer resultado del código se obtuvieron semiamplitudes de velocidad radial para 55 Cnc e, b, c, f y d, de 4.59, 62.64, -4.98, 8.91 y -49.57 m/s, respectivamente. Las velocidades radiales para 55 Cnc e se distancia un poco de los valores reportados, la mayoría de soluciones es de alrededor de 6.0 m/s, y solo se encuentra una velocidad radial de 3.37 ± 0.53 m/s de la mano de Wright et al. 2009. 55 Cnc b también se aleja de los valores esperados, los cuales van de 67 a 78 m/s, siendo 71 m/s el más repetido y para 55 Cnc f se reportan valores desde los 4.8 hasta los 6.2 m/s. Por otro lado, 55 Cnc c y d resultaron en semiamplitudes negativas, lo cual es, por supuesto, incorrecto, las amplitudes reportadas son de alrededor de 10 y 48 m/s respectivamente. 55 Cnc a y b tienen resultados cercanos a

Exoplaneta	K_s [m/s]	K_s "real" [m/s]	$M_p \sin i$ [M_J]	$M_p \sin i$ "real" [M_J]	R_p [R_J]	R_p "real" [R_J]	$e \pm \Delta e$	a [AU]	b	$a \cos i$ [AU]	ω°
55 Cnc e	4.59 ± 0.30	6.02^a	0.02 ± 0.001^b	0.0295^d	0.157^1	0.16	0.05 ± 0.03^b	0.0232	0.38	0.00175	2
55 Cnc b	62.64 ± 0.30	71.37^a	0.74 ± 0.02^b	0.80^a	1.285^2	Desconocido	0.0048 ± 0.0036^b	0.170	—	—	-30
55 Cnc c	9.89 ± 0.30	9.89^a	0.169 ± 0.007^b	0.16^a	?	Desconocido	0.0480 ± 0.031^b	0.356	—	—	30
55 Cnc f	4.97 ± 0.30	5.14^a	0.15 ± 0.01^b	0.15^a	?	Desconocido	0.142 ± 0.06^b	1.157	—	—	2
55 Cnc d	49.57 ± 0.30	48.28^c	3.3 ± 0.1^b	3.12^a	?	Desconocido	0.139 ± 0.016^b	8.931	—	—	60

Table 3. Algunos de los parámetros utilizados en este artículo para realizar el cálculo de K_s , $M_p \sin i$ y R_p para cada exoplaneta de 55 Cnc^a Bourrier et al. 2018^b Rosenthal et al. 2021^c Baluev 2015^d Demory et al. 2011¹ Se obtuvo con $i = 87.5^\circ$ que también fue reportado por Demory et al., 2011. Si se utiliza el ángulo aquí encontrado de $i = 85.65^\circ$ se obtiene una masa de $0.6 M_J$. Este ángulo encaja con los resultados de la mayoría de autores, no obstante, no permite obtener la masa esperada.² Se obtuvo con $i = 89.96^\circ$, similar a los ángulos reportados de $\sim 90^\circ$

con los cuales se puede trabajar, pero los demás planetas están totalmente alejados de un número plausible, 55 Cnc d tiene una muy buena aproximación, aunque negativa, y 55 Cnc c y f parecieran tener los valores cruzados. La gráfica de velocidades radiales respecto el día a partir de la serie de tiempo, también utilizando *Exoplanet*, solo produce las curvas correspondientes a las amplitudes positivas, como era de esperarse, puesto que el posterior análisis estadístico que ejecuta el programa, no admite negativos. Para corregir este error y lograr graficar las curvas de velocidad radial, se corrigió a mano los datos negativos y cruzados, las demás semiamplitudes no se modificaron, logrando el resultado que se muestra en la **Fig. 3**, donde se pueden divisar cinco curvas de velocidad radial para cada uno de los planetas sobre los datos de la serie de tiempo completa sin procesar. No se sabe bien porque *Exoplanet* derivó a estos resultados que a primera vista parecen erróneos, pero a su vez desordenados y muy cercanos a los datos presuntamente reales. Se puede deber a fallas en la estructura del desarrollo de este, que aún se encuentra en construcción, o por la cantidad de exoplanetas con los que se tuvo que trabajar. Se intentó utilizar solo los datos de los tres primeros exoplanetas para ver si el resultado de la semiamplitud mejoraba, sin embargo, no fue así, los mejores valores de K_s que se pudieron conseguir fueron aquellos que tenían en cuenta a los cinco planetas. De aquí en adelante se siguió manejando los datos que desde un principio fueron una buena aproximación junto a aquellos corregidos, en la **Fig. 7** se plasma la K_s con los datos ajustados en fase para cada uno de los exoplanetas.

La metodología aplicada en la Sección 2 permitió encontrar masas muy similares a las que se encuentran en las bases de datos para el sistema, no obstante, no se pudo lograr un ajuste para todos los radios de los planetas. Las suposiciones realizadas permitieron hacer una excelente aproximación del radio de 55 Cnc e para uno de los ángulos reportados en la base de datos. La utilización del ángulo de inclinación de la órbita, para el mencionado exoplaneta, encontrado con estos métodos, de 85.65° , si bien coincide con otros autores, no consiguió un resultado realista cuando se lo introdujo en la ecuación 4, al intentar variar los ángulos se encontró que el radio era increíblemente susceptible a las pequeñas variaciones de la inclinación de la órbita, por lo que se decidió implementar un ángulo de 87.5° para 55 Cnc e y de 89.96° para 55 Cnc b,

aunque su radio sobrepasó los límites esperados, estando al borde de algo factible. dando los mejores valores. Estos ángulos están justificados en la medida en la cuál sabemos que el sistema es coplanar (ver Sección 3). Los datos se presentan en la Tabla 3. Con el cálculo de la masa se puede confirmar que 55 Cnc e es un planeta de tipo rocoso de 6.36 veces la masa de la Tierra, su radio es de 0.157 radios de Júpiter; 55 Cnc b es un gigante gaseoso al tener 0.74 veces la masa de Júpiter, el radio encontrado es de 1.285 radios de Júpiter, lo que desborda un poco en lo intuitivo, puesto que tiene menos masa que el gigante joviano; 55 Cnc c al tener 0.169 veces la masa de Júpiter es un gigante gaseoso similar a Saturno; así mismo 55 Cnc f tiene una masa cercana a la de Saturno de 0.15 masas de Júpiter; por último, 55 Cnc d es el más macivo de todos, sus 3.3 masas de Júpiter lo vuelven un Súper Júpiter. Para ninguno de estos tres últimos se halló un radio coherente (vease la Sección 4 para un discusión más detallada acerca de las características de estos planetas). Por el momento, tampoco hay suficientes datos de la comunidad científica para corroborar el tamaño de los exoplanetas, teniendo en cuenta que estos planetas se conocen desde la década de los 2000, se puede comprobar la dificultad que representa el análisis de 55 Cnc. En cuanto a la curva de luz de la **Fig. 4**, esta mostró una clara presencia de tránsitos de exoplanetas, se pueden observar varias caídas no muy pronunciadas en varios sectores de la distribución, si bien no están definidas para cada uno de los exoplanetas, es una muy buena aproximación teniendo en cuenta el modelaje que se propuso para procesar los datos. Unos cuantos refinamientos en los códigos usados para limpiar el ruido podrían ayudar a mejorar estas curvas.

Con respecto a la habitabilidad, utilizando la masa de 55 Cnc como $M_* = 0.974 M_\odot$ y su radio $R_* = 0.964 M_\odot$, se consiguió una temperatura de 5000 K aproximadamente para la estrella, además de una luminosidad de 0.6 veces la del Sol, estas condiciones derivaron a una zona de habitabilidad que va desde las 0.8 AU hasta las 1.4 AU aproximadamente, el único planeta en esta zona es el gigante gaseoso 55 Cnc f. 55 Cnc b y c están dentro de la zona Runaway Greenhouse, 55 Cnc e también se encuentra en esta zona, no obstante, está prácticamente en el borde, lo cual perjudica demasiado sus posibilidades de haber tenido condiciones para sostener agua líquida (ver **Fig. 5**). 55 Cnc d claramente está muy lejos de cualquier zona dada por

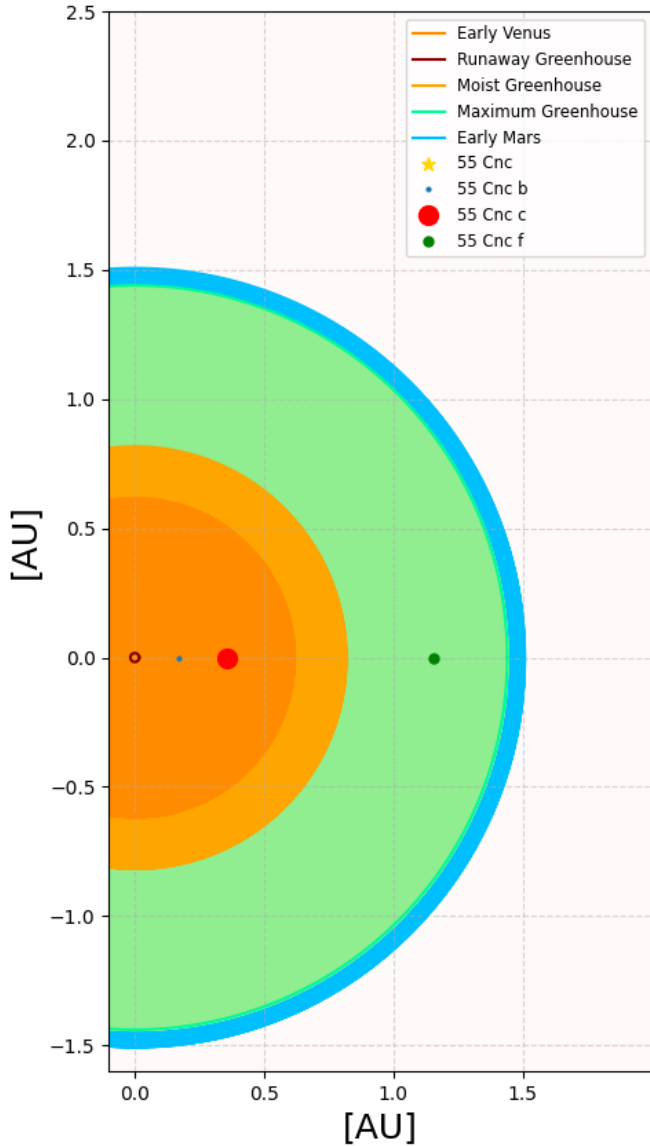


Fig. 5. Zonas de habitabilidad de 55 Cnc, tres de los cinco planetas son graficados. 55 Cnc f es el único que se encuentra en zona habitable en unas condiciones similares a las de la Tierra.

el modelo al tener el semieje mayor más grande de todos los planetas, en la **Fig. 5** podrá ver las zonas mencionadas junto a algunos de ellos. Se confirma que 55 Cnc tiene unas condiciones muy similares de habitabilidad que las del Sol, puesto que es una estrella de secuencia principal, una enana amarilla de masas y radios parecidos.

5 CONCLUSIONES

Pese a lo alejado que podría parecer lo que se obtuvo para las velocidades radiales usando *Exoplanet*, se puede asimilar que para el nivel de complejización que implica la caracterización de un sistema múltiple, lo que conlleva muchos años de estudio y análisis para confirmar solo un planeta, esta herramienta es

una aproximación muy buena dada su relativa simpleza. Como habíamos anunciado al comienzo del artículo, no se encontraron resultados reveladores, pero se pudo confirmar explícitamente que 55 Cnc hospeda al menos un planeta, siendo este 55 Cnc e. En esta misma línea se confirma que el método de velocidad radial permite encontrar exoplanetas a distancias que estén cercanos a su estrella, pero siendo superado en estos términos por el método de tránsito, puesto que en el primero fue bastante claro que se pudo encontrar un periodo de 14.65 días correspondiente a 55 Cnc b, resultado que arrojaron distintas herramientas, y en el segundo 55 Cnc e al estar más cerca facilitó que a través del cálculo geométrico se encontrara un radio más que acorde a las observaciones profesionales. 55 Cnc e, entonces, viene siendo no solo una Súper Tierra, sino también un mundo de lava confirmado tanto por su masa, radio y su distancia a su estrella, esto nos hace afirmar con bastante seguridad que la superficie de 55 Cnc e está totalmente derretida, y dado a su pequeña órbita, se puede afirmar que se encuentra bloqueado gravitacionalmente, esto elevaría aún más las temperaturas, confirmando con los resultados de la zona de habitabilidad, que ninguna traza de agua líquida y ni siquiera gaseosa, podría recidir en este planeta. Debido a los vientos solares y la alta corrosión de su superficie, puesto que es un planeta rocoso que se supone ser de materiales similares a la Tierra, podemos arriesgarnos a decir que podría tener una dinámica atmosférica, la gravedad del planeta sería lo suficientemente fuerte para evitar que toda la cantidad de material desprendido de su superficie escape, además, si bien hay altas temperaturas, la distribución de velocidades de los gases debería superar una velocidad de escape muy grande dada la masa del planeta. Ya a partir de aquí todo se vuelve más inseguro, por las razones anteriormente comentadas, el método de tránsito no permitió encontrar el radio del planeta de manera simple, siendo afectado, por supuesto, por la cantidad de ruido de diversas procedencias. Si no hacemos caso omiso al radio encontrado en este artículo y lo consideramos en la discusión, este gigante gaseoso podría ser catalogado, bien sea como un Júpiter caliente o un gigante hinchado (Puffy planet) caliente, esto debido a que se encuentra muy cerca a su estrella como para suponer que sus temperaturas son increíblemente altas, su masa además se asemeja a la de Júpiter con una posible distribución en un radio más grande, volviéndolo poco denso. Se descarta que sea un Súper Júpiter debido a que no tiene la masa suficiente pese a tener un gran tamaño. Podemos afirmar que en este planeta no hay vida como la conocemos, quizás la dinámica atmosférica a altas presiones permita que exista algún ciclo hidríco a ciertas profundidades, se necesita más investigación para estar seguros, pero sería poco probable. Tampoco habría mucha posibilidad de que albergue una luna que sea capaz de almacenar agua líquida en su superficie, está a una distancia similar a la de Mercurio, lo suficiente para que cualquier cuerpo rocoso sufra sus mismas condiciones y similar destino. Descartamos también la posibilidad de una luna que contenga agua líquida en su superficie, puesto que, hasta donde sabemos, las dinámicas orbitales no permiten que tales cuerpos existan tan cerca a la estrella, una luna como Encelado, por dar un ejemplo, no podría subsistir, hace mucho habría

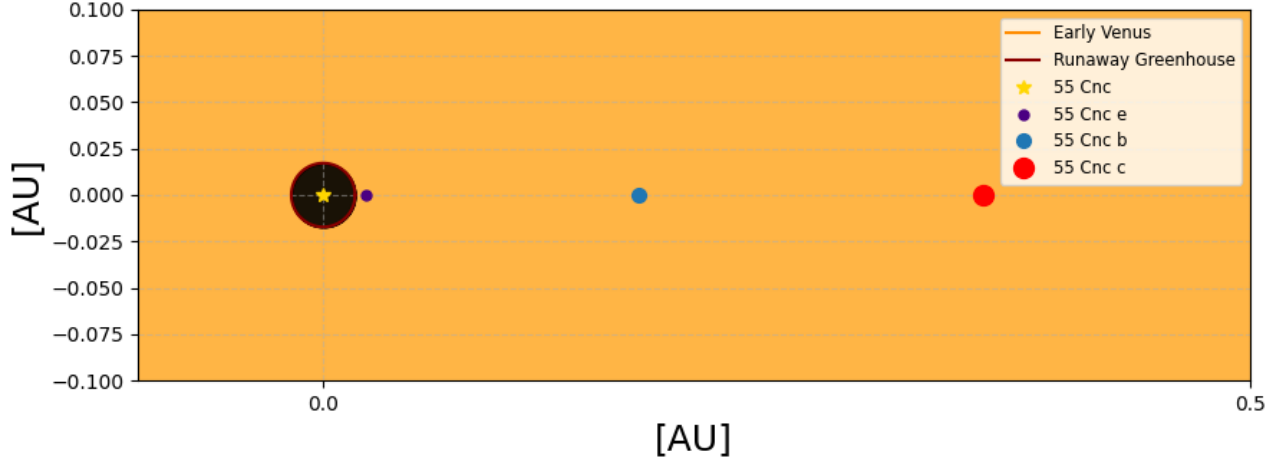


Fig. 6. Límite de la zona Runaway green house de 55 Cnc. Se muestran los tres primeros planetas del sistema que se encuentran a menos de 0.5 AU de su estrella.

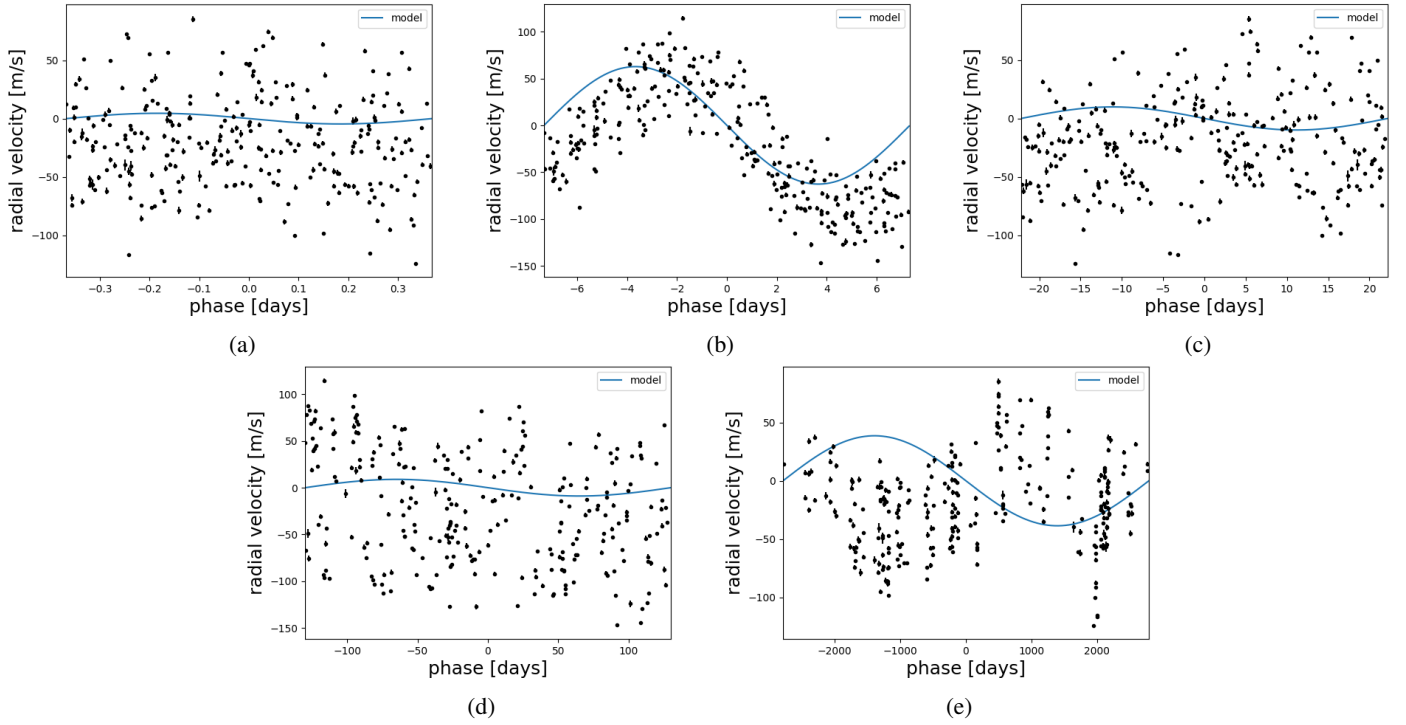


Fig. 7. Curvas en fase de velocidad radial para el sistema 55 Cnc procesadas con *Exoplanet*. (a) 55 Cnc e, (b) 55 Cnc b, (c) 55 Cnc c, (d) 55 Cnc f, (e) 55 Cnc d.

pasado la línea de hielos, en resumen, solo cuerpos rocosos habitarían esta zona y ningún rastro de agua líquida. Sin ser muy diferentes, lo mismo podemos afirmar para 55 Cnc c. 55 Cnc d no presenta para este estudio de habitabilidad un caso relevante, está muy lejos de las zonas donde el agua líquida en la superficie puede existir, además, es un Súper Júpiter, por lo que la única esperanza de encontrar agua líquida sería por un proceso similar al que ocurre con Encelado, si suponemos que este sistema exoplanetario se comporta casi igual que el nuestro, este gigante de 3.3 veces la masa de Júpiter podría albergar lunas

de gran tamaño, los fuertes efectos de marea podrían calentar el hipotético núcleo de una luna helada. Finalmente, 55 Cnc f es el caso más interesante, se encuentra en la zona habitable, a una distancia muy similar a la cual la Tierra orbita el Sol, esto es más que favorable si pensamos en términos de habitabilidad, puesto que se encuentra a una distancia similar en el vecindario planetario de una estrella muy parecida a nuestro Sol, si las condiciones hasta ahora han sido las indicadas, este planeta es el que más posibilidades tiene de permitir agua en estado líquido, si bien no por si mismo, sí a través de lunas.

Hemos visto como 55 Cnc representa un sistema de interés por la variedad de mundos que contiene y por los varios misterios que aún quedan por resolver, este análisis de los datos de velocidad radial y tránsito, más allá de su sencillez, nos permite revelar magníficos comportamientos de mundos más allá del nuestro, nos abre también la puerta a indagar más acerca de aquellos planetas que no han sido tan estudiados como 55 Cnc, en especial 55 Cnc f que podría ser el poseedor de muchas respuestas a preguntas que actualmente se tienen. Sin duda, 55 Cnc seguirá siendo un sistema llamativo para la comunidad científica y, tal vez, dentro de unos años, los avances permitan desarrollar nuevas y mejores técnicas que logren desempañar ese vidrio opaco que en el presente se encuentra frente a nosotros.

REFERENCES

- [1] Baluev, R. V. (2014). Enhanced models for stellar doppler noise reveal hints of a 13-year activity cycle of 55 cancri. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(2), 1493-1511. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2150>
- [2] Bourrier, V., Dumusque, X., Dorn, C., Henry, G. W., Astudillo-Defru, N., Rey, J., Benneke, B., Hébrard, G., Lovis, C., Demory, B., Moutou, C., & Ehrenreich, D. (2018). The 55 Cancri system reassessed. *Astronomy and Astrophysics*, 619, A1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833154>
- [3] Demory, B., Gillon, M., De Wit, J., Madhusudhan, N., Bolmont, É., Heng, K., Kataria, T., Lewis, N. K., Hu, R., Krick, J., Stamenković, V., Benneke, B., Kane, S. R., & Queloz, D. (2016). A map of the large day–night temperature gradient of a super-Earth exoplanet. *Nature*, 532(7598), 207-209. <https://doi.org/10.1038/nature17169>
- [4] The Hipparcos and Tycho catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission, Publisher: Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 1997, Series: ESA SP Series vol no: 1200, ISBN: 9290923997
- [5] ESA. (2023). HIPPARCOS. <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos>
- [6] Daniel Foreman-Mackey, Arjun Savel, Rodrigo Luger, Ian Czekala and Eric Agol, Adrian Price-Whelan, Christina Hedges, Emily Gilbert, Tom Barclay, Luke Bouma, and Timothy D. Brandt. (2021). *exoplanet-dev/exoplanet* v0.4.5. 10.5281/zenodo.1998447. <https://docs.exoplanet.codes/en/v0.4.5/>.
- [7] Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T. (1993). Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101(1), 108-128. <https://doi.org/10.1006/icar.1993.1010>
- [8] Kopparapu, R., Ramirez, R. M., Kasting, J. F., Eymet, V., Robinson, T. D., Mahadevan, S., Terrien, R. C., Domagal-Goldman, S., Meadows, V., & Deshpande, R. (2013). HABITABLE ZONES AROUND MAIN-SEQUENCE STARS: NEW ESTIMATES. *The Astrophysical Journal*, 765(2), 131. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/765/2/131>
- [9] Fischer, D. A., Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S., Laughlin, G., Henry, G. W., Abouav, D., Peek, K. M. G., Wright, J. T., Johnson, J. A., McCarthy, C., & Isaacson, H. (2008). Five planets orbiting 55 Cancri. *The Astrophysical Journal*, 675(1), 790-801. <https://doi.org/10.1086/525512>
- [10] Hara, N., & Ford, E. B. (2023). Statistical methods for exoplanet detection with radial velocities. *Annual review of statistics and its application*, 10(1), 623-649. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-033021-012225>
- [11] Howard, A. W., & Fulton, B. J. (2016). Limits on planetary companions from Doppler surveys of nearby stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 128(969), 114401. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/969/114401>
- [12] Identifying a Planet — PH Coffee Chat. (s.f.). PH Coffee Chat. <https://www.planethunters.coffee/steps-to-identifying-a-planet>
- [13] Nelson, B. E., Ford, E. B., Wright, J. T., Fischer, D. A., Von Braun, K., Howard, A. W., Payne, M. J., & Dindar, S. (2014). The 55 Cancri Planetary System: fully self-consistent n-body constraints and a dynamical analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(1), 442-451. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu450>
- [14] Reid, I. N., & Gizis, J. E. (1997). Low-Mass binaries and the stellar luminosity function. *The Astronomical Journal*, 113, 2246. <https://doi.org/10.1086/118436>
- [15] Rosenthal, L. J., Fulton, B. J., Hirsch, L. A., Isaacson, H., Howard, A. W., Dedrick, C. M., Sherstyuk, I. A., Blunt, S., Petigura, E. A., Knutson, H. A., Behrman, A., Chontos, A., Crepp, J. R., Crossfield, I. J. M., Dalba, P. A., Fischer, D. A., Henry, G. W., Kane, S. R., Kosiarek, M. R., . . . Wright, J. T. (2021). The California Legacy Survey. I. A catalog of 178 planets from precision radial velocity monitoring of 719 nearby stars over three decades. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 255(1), 8. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/abe23c>
- [16] Seager, S., Turnbull, M., Sparks, W. B., Thomson, M., Shaklan, S., Roberge, A., Kuchner, M. J., Kasdin, N. J., Domagal-Goldman, S., Cash, W., Warfield, K., Lisman, D., Scharf, D., Webb, D. R., Trabert, R., Martin, S., Cady, E., & Heneghan, C. (2015). The Exo-S Probe Class Starshade mission. *Proceedings of SPIE*. <https://doi.org/10.1117/12.2190378>
- [17] https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/overview/55%20cancristar-Cnc_collapsible