



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Graduação

Curso de Graduação em Física

DETERMINAÇÃO DA ZONA HABITÁVEL DE EXOPLANETAS

Lariele Fernanda Spatti

Prof. Dr. Nelson Callegari Jr.

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

LARIELE FERNANDA SPATTI

DETERMINAÇÃO DA ZONA HABITÁVEL DE EXOPLANETAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Licenciada em Física.

Rio Claro (SP)

2022

S738d

Spatti, Lariele Fernanda

Determinação da zona habitável de exoplanetas / Lariele Fernanda

Spatti. -- Rio Claro, 2022

71 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura - Física) -  
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Nelson Callegari Jr

1. Zonas habitáveis. 2. Exoplanetas. 3. Super Terras. 4. Ciclos  
orbitais. 5. Atmosfera. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

LARIELE FERNANDA SPATTI

DETERMINAÇÃO DA ZONA HABITÁVEL DE  
EXOPLANETAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Licenciada em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Nelson Callegari Jr.

Prof. Dr. Ricardo Paupitz Barbosa dos Santos

Prof. Dr. Adrià Rodriguez Colucci

Rio Claro, 22 de novembro de 2022.

---

Assinatura da(o) aluna(o)

---

Assinatura da(o) orientadora(o)

*Esse trabalho é dedicado à minha família*

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente aos meus pais que sempre me apoiaram e me incentivaram a buscar aquilo que me trouxesse felicidade, bem como a lutar pelos meus sonhos, eu não teria conseguido sem o apoio incondicional deles. Ao meu orientador, gostaria de agradecer pela paciência e disponibilidade em me ajudar a desenvolver essa pesquisa.

*"Se não existe vida fora da Terra, então o universo é um grande desperdício de espaço"*  
*Carl Sagan*

## RESUMO

A Zona Habitável de um sistema planetário é definida como a região ao redor de uma estrela onde é possível a existência de água líquida na superfície de um corpo celeste e que a temperatura varie de forma com que não seja quente demais para que essa água evapore, nem fria demais para que a água congele. Planetas e satélites nessa região são chamados, em princípio, habitáveis, já que a HZ define condições físicas da superfície do planeta que são propícias para o desenvolvimento do tipo de vida corrente no planeta. A rotação planetária é um fator muito importante ao se determinar a habitabilidade de um planeta, isso porque a maioria dos planetas identificados até hoje são considerados “quentes”, ou seja, planetas que se encontram muito perto de suas estrelas hospedeiras. Assim como a rotação planetária, forças oriundas da atração gravitacional mútua entre os planetas também apresentam grande influência no clima da Terra e, portanto, na sua habitabilidade. Um exemplo disso é a variação da excentricidade orbital sendo um dos responsáveis por conduzir a Terra a períodos de glaciação em intervalos de tempo regulares. Nesse trabalho tentaremos encontrar características nos exoplanetas Wolf 1061 c, Kepler-452 b, Kepler-440 b, GJ 682 b e Pi Men c que nos indiquem sua habitabilidade, assim como determinar suas Zonas Habitáveis com a utilização de um modelo computacional proposto por Müller Haghhighipour (2014), o sistema em que esses exoplanetas se encontram também será analisado, procurando a existência de exoplanetas gigantes, do tipo Super Júpiteres e Super Netunos, e determinando qual o tipo de interferência que pode ser causada na habitabilidade e na zona habitável de um exoplaneta pela existência desses exoplanetas gigantes.

**Palavras chave:** Zonas Habitáveis; Exoplanetas; Super Terras; Ciclos orbitais; Atmosfera.

## ABSTRACT

The Habitable zone of a planetary system is defined as the region around a star where it's possible for liquid water to exist on the surface of a celestial body and that the temperature varies so that it's not too hot for that water evaporates, nor too cold for that water to freeze. Planets and satellites in this region are called, in principle, habitable, since the HZ defines physical condition of the surface of the planet that are propitious for the development of the current type of life on the planet. Planetary rotation is a very important factor in determining the habitability of a planet, this is because most of the planets identified to date are considered "hot", that is, planets that are very close to their host stars. As with planetary rotation, forces arising from the mutual gravitational attraction between the planets also have a great influence on the Earth's climate and, therefore, on the its habitability. An example of this is the variation of the orbital eccentricity being a responsible for leading Earth to periods of glaciation at regular intervals of time. In this work we will try to find features on the exoplanets Wolf 1061c, GJ 682b, Kepler 440b, Kepler 452b and Pi Men c that indicate their habitability, as well as determine their habitable zone using a computational model proposed by Müller Haghhighipour (2014), the system in which these exoplanets are found will also be analyzed, looking for the existence of giant exoplanets, of the Super Jupiter's and Super Neptune's, and determining what kind of interference can be caused in the habitability and habitable zone of an exoplanet by the existence of these giant exoplanets.

**Keywords:** Habitable zones; Exoplanets; Super Earth's; Orbital cycles; Atmosphere.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Hertzsprung-Russel que relaciona a luminosidade da estrela com sua temperatura superficial. . . . .	16
Figura 2 – Ilustração do movimento da estrela em relação a um observador na Terra e a variação da frequência de luz percebida. . . . .	17
Figura 3 – As diferentes fases do trânsito planetário e a variação da luminosidade recebida. . . . .	18
Figura 4 – Figura relacionando a massa da estrela com a distância. . . . .	20
Figura 5 – Variações orbitais terrestres. (A) excentricidade orbital; (B) Inclinação do eixo terrestre; (C)Precessão dos equinócios. . . . .	22
Figura 6 – Interface do site [//astro.twam.info/hz/].] . . . . .	25
Figura 7 – Interface do site [//astro.twam.info/hz/].] . . . . .	26
Figura 8 – Interface do site [//astro.twam.info/hz/].] . . . . .	26
Figura 9 – Relação da pressão parcial de $CO_2$ e $H_2O$ e da temperatura de superfície em relação a distância orbital . . . . .	30
Figura 10 – Diagrama ilustrando o ciclo do carbono-silicato, também conhecido como ciclo do carbono inorgânico. . . . .	33
Figura 11 – Definição dos cinturões de alta e baixa pressão gerados pelas células de circulação nas condições de máximo e mínimo climático. . . . .	37
Figura 12 – Máximos e mínimos climáticos causados pela interferência dos ciclos orbitais nos últimos 400 mil anos. . . . .	38
Figura 13 – Representação da estrela Wolf 1061 ao lado do Sol. . . . .	39
Figura 14 – Representação do exoplaneta Wolf 1061c ao lado da Terra. . . . .	40
Figura 15 – Componente de excentricidade da dinâmica orbital dentro do sistema Wolf 1061, mostrado para os planetas b, c e d (painéis superior, central e inferior, respectivamente). . . . .	41
Figura 16 – Zona Habitável do sistema planetário Wolf 1061 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Wolf 1061c. . . . .	42
Figura 17 – Zona Habitável do sistema planetário Wolf 1061 pelo modelo proposto por [Kopparapu <i>et al.</i> 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Wolf 1061c. . . . .	43
Figura 18 – Representação da estrela GJ 682 ao lado do Sol. . . . .	44
Figura 19 – Representação do exoplaneta GJ 682b ao lado da Terra. . . . .	45
Figura 20 – Zona Habitável do sistema planetário GJ 682 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta GJ 682b. . . . .	46

Figura 21 – Zona Habitável do sistema planetário GJ 682 pelo modelo proposto por [Kopparapu <i>et al.</i> 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta GJ 682b. . . . .	46
Figura 22 – Representação da estrela Kepler 440 ao lado do Sol. . . . .	47
Figura 23 – Representação do exoplaneta Kepler 440b ao lado da Terra. . . . .	48
Figura 24 – Zona habitável conforme definido por [Kopparapu <i>et al.</i> 2013] e [Zsom <i>et al.</i> 2013]. As linhas retas correspondem aos limites "Jovem Vênus" e "Marte Recente", as linhas pontilhadas correspondem ao limites de "Perda de água" e "1ª condensação do $CO_2$ ". A linha tracejada corresponde ao limite "Deserto seco". . . . .	49
Figura 25 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 440 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler 440b. . . . .	50
Figura 26 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 440 pelo modelo proposto por [Kopparapu <i>et al.</i> 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler440b. . . . .	50
Figura 27 – Representação da estrela Kepler 452 ao lado do Sol. . . . .	51
Figura 28 – Representação do exoplaneta Kepler 452b ao lado da Terra. . . . .	52
Figura 29 – Distribuição global de SATs e fração de gelo marinho na simulação de $E - CO_2$ . (a) SATs em k, (b) fração de gelo marinho em %. . . . .	53
Figura 30 – Distribuição global de SATs e fração de gelo marinho na simulação de $L - CO_2$ . (a) SATs em k, (b) fração de gelo marinho em %. . . . .	54
Figura 31 – Distribuição global de SATs na simulação de $H - CO_2$ . (a) SATs em k. . . . .	54
Figura 32 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 452 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler 452b. . . . .	55
Figura 33 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 452 pelo modelo proposto por [Kopparapu <i>et al.</i> 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler 452b. . . . .	55
Figura 34 – Representação da estrela Pi Mensae ao lado do Sol. . . . .	56
Figura 35 – Representação do exoplaneta Pi Mensae c ao lado da Terra. . . . .	57
Figura 36 – Zona Habitável do sistema planetário Pi Mensae pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c. . . . .	58
Figura 37 – Zona Habitável do sistema planetário Pi mensae pelo modelo proposto por [Kopparapu <i>et al.</i> 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c. . . . .	58

Figura 38 – Zona Habitável do sistema planetário Pi Mensae pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c. . . . .	59
Figura 39 – Zona Habitável do sistema planetário Pi mensae pelo modelo proposto por [Kopparapu <i>et al.</i> 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c. . . . .	59
Figura 40 – Representação do sistema planetário da estrela Wolf 1061. . . . .	61
Figura 41 – Representação do sistema planetário da estrela Wolf 1061 em comparação com o sisema solar. . . . .	62
Figura 42 – Representação do sistema planetário da estrela GJ 682. . . . .	63
Figura 43 – Representação do sistema planetário da estrela GJ 682 em comparação com o sisema solar. . . . .	63
Figura 44 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 440. . . . .	64
Figura 45 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 440 em comparação com o sisema solar. . . . .	64
Figura 46 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 452. . . . .	65
Figura 47 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 452 em comparação com o sistema solar. . . . .	66
Figura 48 – Representação do sistema planetário da estrela Pi Mensae c. . . . .	66
Figura 49 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 440 em comparação com o sisema solar. . . . .	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperatura de superfície da Terra em relação a dos planetas estudados.	35
Tabela 2 – Excentricidade da Terra em relação a dos planetas estudados. . . . .	36
Tabela 3 – Dados dos planetas orbitando a estrela Wolf 1061. . . . .	40
Tabela 4 – Dados dos planetas orbitando a estrela GJ 682. . . . .	44
Tabela 5 – Dados dos planetas orbitando a estrela Kepler 440. . . . .	48
Tabela 6 – Dados dos planetas orbitando a estrela Kepler 452. . . . .	51
Tabela 7 – Dados dos planetas orbitando a estrela Pi Mensae . . . . .	56

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	15
1.1	Tipos de Estrelas . . . . .	15
1.2	Exoplanetas . . . . .	17
1.3	Zonas Habitáveis . . . . .	19
1.4	Evolução estelar . . . . .	19
1.5	Rotação planetária . . . . .	21
1.6	Ciclos de Milankovitch . . . . .	22
2	OBJETIVO . . . . .	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .	25
4	DISCUSSÃO E RESULTADOS . . . . .	28
4.1	Habitabilidade . . . . .	28
4.2	Atmosfera . . . . .	31
4.3	Temperatura . . . . .	33
4.4	Variações nos ciclos orbitais e suas respostas climáticas . . . . .	35
4.5	Wolf 1061c . . . . .	38
4.6	GJ 682b . . . . .	44
4.7	Kepler 440b . . . . .	47
4.8	Kepler 452b . . . . .	51
4.9	Pi Mensae c . . . . .	56
5	CONCLUSÃO . . . . .	61
	REFERÊNCIAS . . . . .	68

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TIPOS DE ESTRELAS

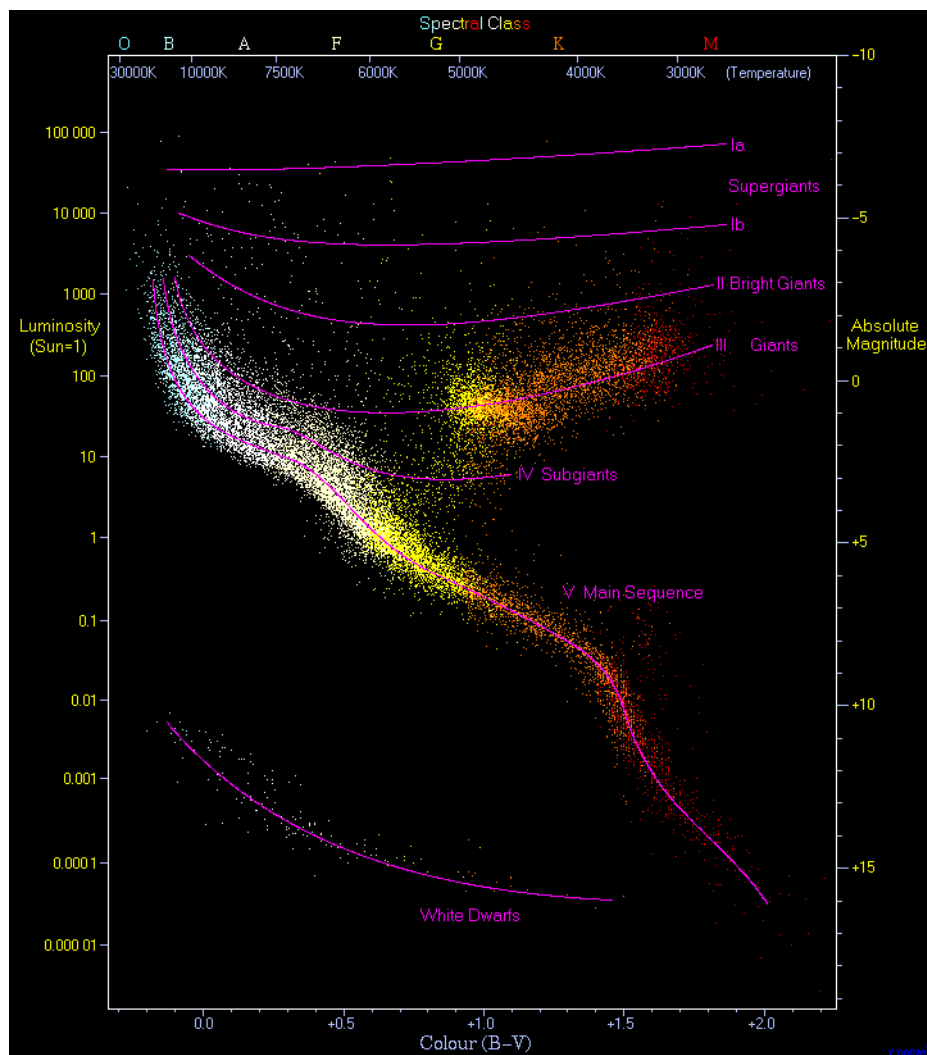
Todas as estrelas "nascem" do mesmo processo, no interior de nebulosas, gigantes nuvens de gás compostas principalmente por hélio e hidrogênio, em regiões que apresentam maior concentração, conhecidas como protoestrelas. Nessas regiões, a força gravitacional é maior, levando a contração e conseqüentemente aquecimento. O resultado vai depender do tamanho dessa região mais densa, se o volume de gás for grande o suficiente há queima do Hidrogênio, processo conhecido como fusão nuclear, onde dois elementos simples se fundem para dar origem a um elemento mais pesado. Esse processo é responsável por liberar uma grande quantidade de energia, e dessa forma nascem as estrelas. Caso contrário não há massa suficiente, dessa forma, após o processo de contração a temperatura não aumenta o suficiente para iniciar o processo de fusão, o corpo começa então a esfriar dando origem a uma anã marrom, corpos celestes que emitem muita pouca energia, sendo mais parecidos com planetas como Júpiter.

O tempo de vida de uma estrela assim como sua luminosidade vão depender da sua massa: quanto mais massiva uma estrela é, mais luminosidade ela emite, ou seja, ela libera mais energia por unidade de tempo e por isso seu tempo de vida é menor. Como um dos pré-requisitos ao determinar uma zona habitável é o tempo de vida da estrela, que deve ser longo o suficiente para que a vida seja capaz de se estabelecer e evoluir, não é interessante buscar zonas habitáveis ao redor de estrelas supergigantes, que emitem muita radiação e por isso seu tempo de vida é relativamente curto. A busca por zonas habitáveis tem se restringido a estrelas que estão na sequência principal (SP), fase da vida mais longa de uma estrela, quando dentro de seu núcleo ela está fundindo hidrogênio em hélio e brilhando de forma estável. As estrelas são classificadas de acordo com seu tamanho, recebendo nomes como: supergigantes, gigantes brilhantes, gigantes, subgigantes, anãs (ou normais) e subanãs. Para facilitar a comunicação esses nomes geralmente são trocados por números romanos crescentes do I ao VI. Também é possível classificar as estrelas de acordo com a sua temperatura, sendo utilizadas as letras O, B, A, F, G, K, M, R, N e S, para cada faixa de temperatura. Outra forma de classificação usa números arábicos que variam de 0 a 9, utilizados para rotular variações de temperatura e brilho para estrelas de uma mesma classe.

O diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) [figura 1] tem sido um diagrama importante para a compreensão da evolução estelar, publicado independentemente pelo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1905) e mais tarde pelo americano Henry Norris Russell (1919) com uma relação entre a luminosidade de uma estrela e sua temperatura efetiva.

Hertzsprung descobriu que estrelas da mesma cor podiam ser divididas entre luminosas, que ele chamou de gigantes, e estrelas de baixa luminosidade, que ele chamou de anãs. Dessa forma, duas estrelas poderiam pertencer a mesma classe espectral e apresentar luminosidades diferentes. Russel estendeu o estudo de Hertzsprung para as estrelas mais quente. No diagrama HR a luminosidade, ou magnitude absoluta, assim como a temperatura superficial de uma estrela, são características facilmente determináveis para estrelas de distâncias conhecidas: a primeira pode ser encontrada a partir da magnitude aparente, e a segunda a partir de sua cor ou tipo espectral. A primeira coisa que se nota nesse diagrama, é que as estrelas não se distribuem igualmente, mas se concentram em algumas regiões. A maior parte das estrelas está alinhada ao longo de uma faixa na diagonal que vai do extremo superior esquerdo, onde se encontram as estrelas quentes e muito luminosas, até o extremo inferior direito, com estrelas frias e pouco luminosas. Essa faixa é chamada seqüência principal.

Figura 1 – Diagrama de Hertzsprung-Russel que relaciona a luminosidade da estrela com sua temperatura superficial.



[Langer e Kudritzki 2014]

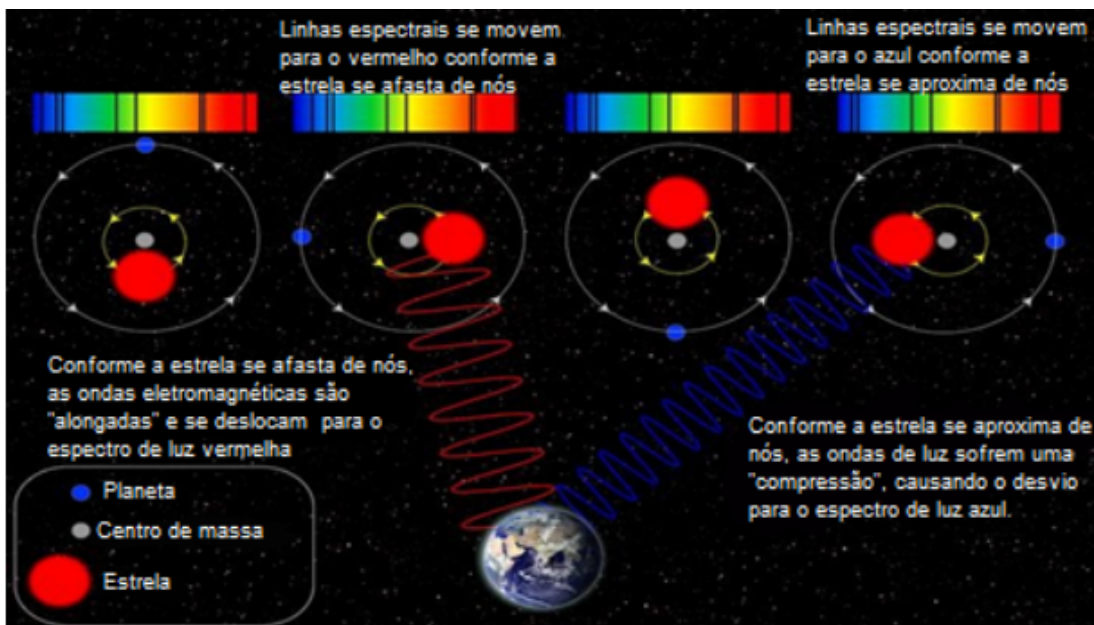
O sol, por exemplo, é uma estrela em sequência principal do tipo G2V, ou seja, uma estrela de tamanho normal e com temperatura superficial de aproximadamente 5778 K.

Neste trabalho vamos nos restringir a determinar as zonas habitáveis ao redor de estrelas do tipo G, K e M que contenham Super-Terras em seu sistema planetário.

## 1.2 EXOPLANETAS

Exoplanetas, também conhecidos como planetas extrasolares, são planetas que se localizam fora do sistema solar, ou seja, planetas que orbitam uma estrela que não é o sol. Por estarem a muitos anos luz de distância da Terra a identificação e aquisição de informação sobre esses planetas é difícil, pois podemos observar diretamente apenas objetos que emitem ou refletem luz, e planetas são corpos celestes que orbitam ao redor de uma estrela sem emitir luz. Dessa forma, a melhor maneira de identificar esses planetas é observando a luz que eles refletem. O problema desse método é que muitas vezes a luz refletida é ofuscada pela luz emitida pela estrela que o planeta orbita.

Figura 2 – Ilustração do movimento da estrela em relação a um observador na Terra e a variação da frequência de luz percebida.

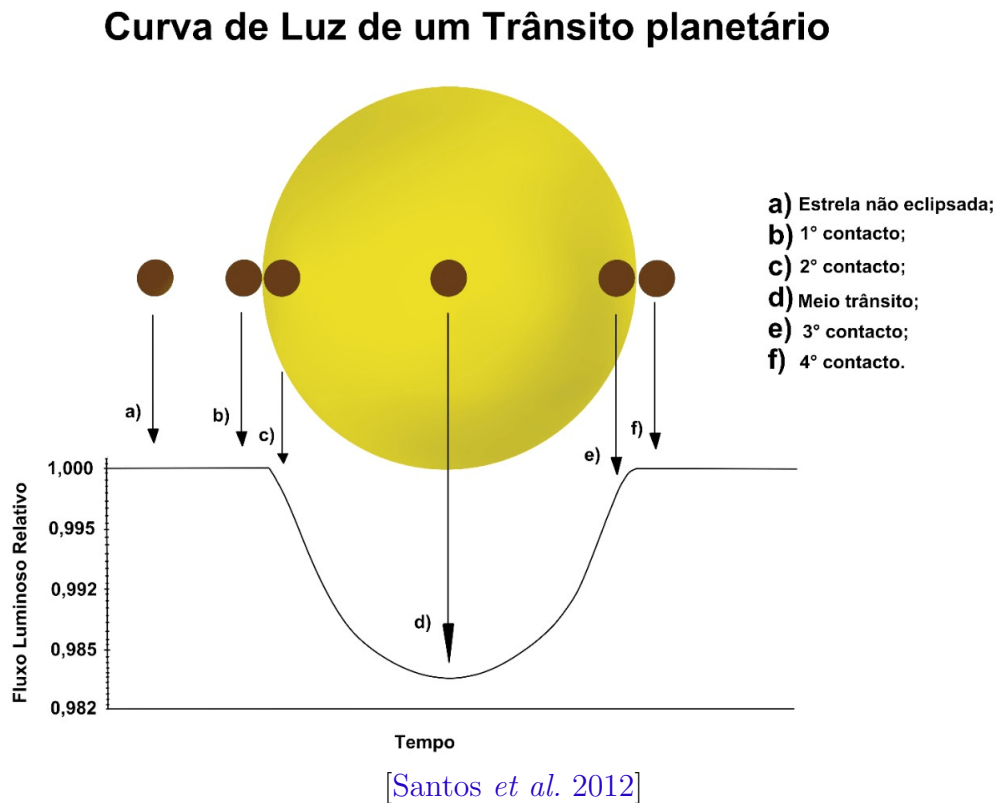


[Lenchuk *et al.* 2021]

O primeiro exoplaneta, confirmado, foi descoberto em 1995 pelos suíços Michel Mayor e Didier Queloz da Universidade de Genebra através do método de variação de velocidade radial, 51 Pegasi b é um planeta situado a aproximadamente 50 anos luz da

Terra na constelação de Pegasus, orbitando uma estrela em sequência principal. Esse planeta, assim como vários outros descobertos após isso, pertencem a classe planetária chamada “Júpiteres quentes” devido a sua proximidade com a estrela que orbitam, isto é, planetas gigantes que tem período de pouco dias, geralmente menores que o período de Mercúrio com 88 dias, e que orbitam estrelas pequenas, com massa menor que o sol.

Figura 3 – As diferentes fases do trânsito planetário e a variação da luminosidade recebida.



A identificação de novos exoplanetas é feita de forma indireta, sendo os métodos de velocidade radial e fotometria os mais utilizados. O método de velocidade radial, também chamado de método Doppler [figura 2], consiste na análise de pequenas mudanças nas linhas espectrais estelares por meio de deslocamento do centro de massa do sistema devido a atração gerada pelo campo gravitacional do exoplaneta, a partir da análise dessas linhas espectrais é possível determinar a velocidade radial com a qual a estrela hospedeira se aproxima ou afasta da Terra. Outro método é a fotometria, também chamado de trânsito estelar [figura 3], trânsitos ocorrem quando um planeta atravessa o disco da estrela em uma posição frontal quando observado da Terra. A técnica consiste em observar pequenas variações na intensidade luminosa da estrela causadas por planetas com raios suficientes para causar um decréscimo na luminosidade da estrela. Esse decréscimo na luminosidade vai depender do tamanho do planeta, do tamanho da estrela e da distância orbital do

planeta em relação a estrela.

### 1.3 ZONAS HABITÁVEIS

A Zona Habitável (Habitable Zone – HZ) de um sistema planetário é definida como a região ao redor de uma estrela onde é possível a existência de água líquida na superfície de um corpo celeste e que a temperatura varie de forma com que não seja quente demais para que essa água evapore, nem fria demais para que a água congele. Planetas e satélites nessa região são chamados, em princípio, habitáveis, já que a HZ define condições físicas da superfície do planeta que são propícias para o desenvolvimento do tipo de vida corrente no planeta Terra. É importante ressaltar que o fato de estar dentro de uma HZ, isoladamente, não garante que o planeta ou satélite seja de fato habitável.

Através de métodos computacionais, [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] propôs um modelo que relaciona a massa da estrela com sua distância [figura 4]. Nesse modelo a linha contínua representa a Zona Habitável, região na qual é possível a existência de água líquida na superfície do planeta. As linhas tracejadas representam a região ao redor da estrela em que planetas terrestres são formados, já as linhas pontilhadas indicam as distâncias em que planetas com órbita circular apresentam rotação síncrona como efeito do amortecimento causado pelas forças de maré.

As “Super Terras Quentes” são exoplanetas rochosos, quentes e menores que os gigantes gasosos e que apresentam uma distância orbital (semieixo maior) pequena, variando entre 0.06 e 0.1 AU. Dessa forma, as “Super Terras Quentes” presentes em HZ são aquelas que orbitam estrelas do tipo M, também chamadas de anãs vermelhas, com aproximadamente  $0.6M_{\odot}$ <sup>1</sup>, raio equivalente a  $0,3R_{\odot}$  e com temperatura efetiva de aproximadamente 2000-3000K, são estrelas são menores que o sol, que é uma estrela do tipo G com  $1 M_{\odot}$  e com temperatura efetiva de 5000-6000K.

### 1.4 EVOLUÇÃO ESTELAR

Outro tópico relacionado a habitabilidade é a evolução estelar, já que o sol, assim como todas as outras estrelas em sequência principal, também é afetado pela evolução estelar. O sol, assim como as outras estrelas, tem sua luminosidade aumentada durante seu tempo de vida dentro da sequência principal [Newman e Rood 1977], [Gough 1981], [Gilliland 1989].

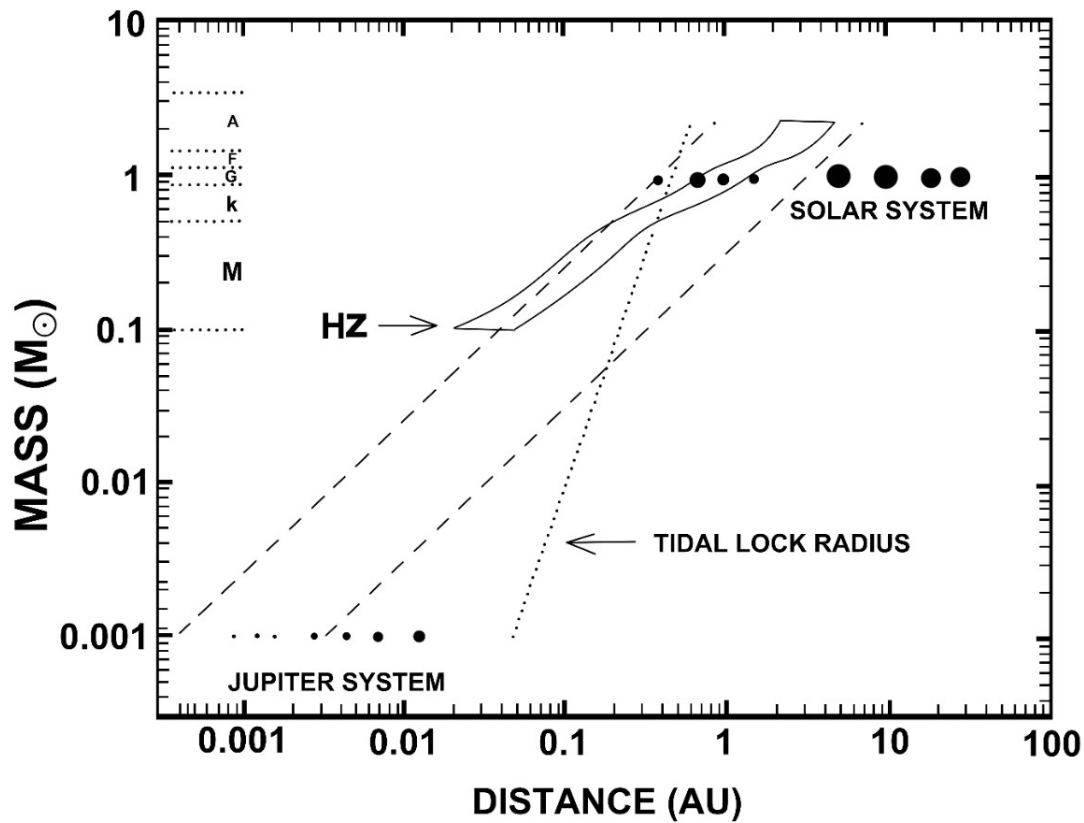
A sequência principal é a fase mais longa e relativamente estável da vida de uma estrela, correspondendo a 90% do seu tempo de vida. Para o Sol, esse período de estabilidade é de aproximadamente 11 Gyr<sup>2</sup> [Maciel 1995]. Durante a vida de uma estrela

---

<sup>1</sup>  $M_{\odot}$  = Massa do Sol

<sup>2</sup> 1 Gyr é equivalente a  $10^9$  anos

Figura 4 – Figura relacionando a massa da estrela com à distância.



[Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]

duas forças principais e opostas agem sobre ela, a gravidade e a pressão exercida pela radiação liberada pelas reações nucleares que ocorrem em seu interior. Durante a fase de SP de uma estrela ela sofre alterações devido a queima do hidrogênio que acarreta em mudanças graduais na composição química de seu núcleo. Isso se deve ao fato de a massa de uma estrela e sua luminosidade serem duas grandezas diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a sua massa, maior deve ser a luminosidade emitida por ela, ou o inverso.

$$M \propto L^3 \quad (1.1)$$

Através dessa relação é possível explicar porque estrelas massivas tem um tempo de vida muito curto quando comparado com outras estrelas menores, isso acontece porque quanto maior for a massa de uma estrela mais energia ela precisa liberar através da pressão exercida pelas reações químicas em seu núcleo para poder equilibrar a força

gravitacional em sentido oposto. Dessa forma, estrelas massivas são capazes de gerar taxas altíssimas de energia em seu interior e por isso o hidrogênio presente na estrela acabe muito rápido.

De acordo com modelos, o sol era aproximadamente 30% mais obscuro quando o sistema solar foi formado a cerca de 4.6 Gyr, e sua luminosidade deve aumentar cerca de três vezes o valor atual quando o Sol deixar a sequência principal daqui a aproximadamente 5Gyr [Jr 1967].

## 1.5 ROTAÇÃO PLANETÁRIA

A rotação planetária é um fator muito importante ao se determinar a habitabilidade de um planeta, isso porque a maioria dos planetas identificados até hoje são considerados “quentes”, ou seja, planetas que se encontram muito perto de suas estrelas hospedeiras. Esses planetas são mais fáceis de serem encontrados já que estão mais próximos de suas estrelas e por isso apresentam um sinal maior e mais frequente [Kaltenegger e Kasting 2008].

A proximidade com a estrela sugere que esses planetas apresentem uma rotação afetada pela força de maré, um efeito secundário a gravidade, ele surge porque a aceleração gravitacional experimentada por uma grande massa não é distribuída igualmente em todo seu diâmetro, o que resulta em exoplanetas com uma taxa rotacional fortemente reduzida.

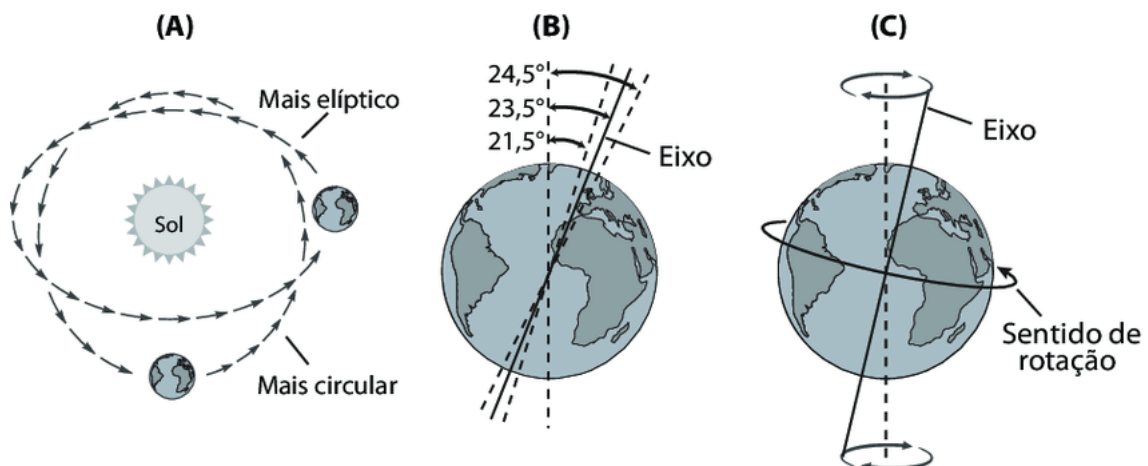
Um efeito produzido pela diminuição da taxa de rotação pode resultar em um processo de sincronismo, também conhecido como acoplamento de maré, onde uma das faces do planeta será sempre iluminada pela estrela, enquanto o outro lado do planeta não receberá energia de forma direta da estrela. Um planeta sujeito ao acoplamento de maré leva para rotacionar ao redor de seu próprio eixo o mesmo intervalo de tempo que ele leva para completar o movimento de translação ao redor da estrela. Por causa disso, a temperatura em um dos lados do planeta será elevada, enquanto a outra será muito reduzida, o que resulta em uma atmosfera tênue e a inexistência de um oceano líquido estável [Kaltenegger e Kasting 2008].

No primeiro estágio do acoplamento de maré, apenas o corpo menor está acoplado ao corpo maior, isso porque é necessário muito mais tempo para que o corpo maior se acople ao seu companheiro, porém, com tempo suficiente ambos os corpos podem estar acoplados entre si por maré, esse processo ocorrerá mais rapidamente quando a diferença entre as massas e a distância entre os corpos for pequena. Variações na excentricidade orbital e na obliquidade de um exoplaneta também podem influenciar variações climáticas [Spiegel *et al.* 2010].

## 1.6 CICLOS DE MILANKOVITCH

Forças oriundas da atração gravitacional mútua entre os planetas também apresentam grande influência no clima da Terra e, portanto, na sua habitabilidade. Um exemplo disso é a variação da excentricidade orbital sendo um dos responsáveis por conduzir a Terra a períodos de glaciação em intervalos de tempo regulares. Tal fenômeno foi descrito em 1941 por Milutin Milankovitch em sua teoria astronômica sobre a Era do gelo. Ciclos climáticos são produzidos pelas interações dos parâmetros orbitais da Terra, excentricidade, obliquidade e precessão dos equinócios, que de forma periódica são responsáveis por alterar o grau de insolação sazonal que a Terra recebe [Milankovitch 1941], [Berger 1980], [Lockwood 1980], [Kukla e Gavin 1992], [Boer e Smith 1994]. Essas variações são influenciadas pelos movimentos dos corpos celestes do sistema solar, dessa forma, os parâmetros orbitais da Terra oscilam de acordo com mudanças nos campos gravitacionais e magnéticos gerados pelo Sol, Lua e outros planetas do sistema solar, em especial Júpiter e Saturno [Scafetta 2010]. Segundo Milankovitch a quantidade de radiação solar recebida pela Terra muda por três razões principais.

Figura 5 – Variações orbitais terrestres. (A) excentricidade orbital; (B) Inclinação do eixo terrestre; (C) Precessão dos equinócios.



[Oliveira *et al.* 2017]

**Excentricidade orbital:** A excentricidade causa uma variação na órbita da Terra ao redor do Sol de elíptica para praticamente circular, e possui uma periodicidade de aproximadamente 100.000 anos. Quando a órbita é mais circular, a diferença de temperatura entre as estações é pequena, entretanto, existe uma diferença significativa na distância entre a Terra e o Sol durante as estações quando a órbita é mais elíptica [Figura 5-A]. É interessante notar que o efeito da excentricidade no clima depende também da precessão dos equinócios.

**Inclinação axial:** A Terra gira sobre um eixo imaginário, que forma atualmente um ângulo de  $23,5^{\circ}$  em relação ao plano de rotação. Esse ângulo não é constante variando de  $24,5^{\circ}$  a  $21,5^{\circ}$  em períodos de 41.000 anos [Figura 5-B]. A obliquidade causa a sazonalidade

devido a inclinação do eixo de rotação da Terra, de modo que, quanto mais inclinado for o eixo maior será a sazonalidade. Outro efeito da obliquidade é a defasagem entre as estações nos hemisférios norte e sul, por isso enquanto é verão no hemisfério sul, no hemisfério norte será inverno.

**Precessão axial:** A Terra oscila sobre seu eixo de rotação com um movimento análogo ao de um pião, esse fenômeno é conhecido como precessão dos equinócios e tem um período de 26.000 anos, durante o qual o eixo de rotação oscila e forma um círculo [Figura 5-C]. Por causa da precessão do eixo e de outros movimentos astronômicos, as posições de equinócio e solstício se deslocam lentamente ao longo da órbita elíptica da Terra [Oliveira *et al.* 2017].

O efeito combinado dos ciclos de excentricidade e obliquidade é capaz de causar uma defasagem nos efeitos da precessão nos hemisférios, por exemplo, quando o periélio<sup>3</sup> ocorre durante o verão no hemisférios Norte o afélio<sup>4</sup> ocorrerá seis meses depois no inverno do hemisfério Sul. Dessa forma, é possível entender por que quando a orbita da Terra é elíptica ocorrem verões quentes, periélio no verão, em um hemisfério e invernos frios, afélio no inverno, no outro hemisfério, enquanto que com uma orbita circular, ocorrem verões moderados, verão no afélio, e invernos moderados, periélio no inverno. Esse padrão é invertido gradualmente em um ciclo de precessão. O ciclo de obliquidade pode se tornar dominante quando a excentricidade se aproxima de zero.

O efeito dessas três características é mais claro quando seus extremos se combinam, dessa forma, quando a orbita é a mais excêntrica possível, se a precessão deixa a Terra mais longe do sol durante o inverno e o ângulo em relação ao eixo de rotação é máximo com  $24.5^{\circ}$ , então os invernos serão muito frios e os verões muito quentes. Além de alterar a quantidade de luz que atinge a Terra, as variações orbitais também modificam a distribuição de radiação no globo.

---

<sup>3</sup> Ponto definido na órbita da Terra em que o planeta está mais próxima do Sol

<sup>4</sup> Ponto definido na órbita da Terra em que o planeta está mais distante do Sol

## 2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo determinar os critérios básicos que fazem com que um exoplaneta seja considerado habitável, identificando quais características são indispensáveis para se determinar a habitabilidade de um planeta, ou seja, sua capacidade de gerar ou hospedar o tipo de vida corrente na Terra. A partir disso, tentaremos encontrar essas características nos exoplanetas Wolf 1061 c, Kepler-452 b, Kepler-440 b, GJ 682 b e Pi Men c. Para determinar a habitabilidade desses exoplanetas analisaremos alguns indicativos como tamanho, massa, raio, variação orbital, distância da estrela, pressão, densidade, luminosidade, temperatura, radiação recebida, ciclos geoquímicos [[Spiegel \*et al.\* 2010](#)]. Além de determinar a zona habitável desses exoplanetas, vamos analisar a existência de exoplanetas gigantes, do tipo Super Júpiteres e Super Netunos, em seus sistemas e como esses exoplanetas gigantes podem interferir na habitabilidade de um exoplanetas através dos ciclos de Milankovich.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho analisaremos a bibliografia existente sobre o assunto, relembrado conceitos como habitabilidade, exoplanetas e variação orbital, também conhecida como ciclos de Milankovitch. Após essa análise vamos determinar a zona habitável dos exoplanetas Wolf 1061 c, Kepler-452 b, Kepler-440 b, GJ 682 b e Pi Men c por meio de um modelo computacional proposto por [Müller e Haghighipour 2014] através do site [//astro.twam.info/hz/]. Dessa forma, utilizando dados como temperatura, massa e luminosidade da estrela hospedeira é possível determinar sua Zona Habitável de acordo com o modelo escolhido. Neste trabalho os modelos escolhidos foram os de [?] e [?].

Figura 6 – Interface do site [//astro.twam.info/hz/].

Habitable Zones in Multiple Star Systems

Using this website, you can calculate the habitable zones of single, binary and multiple star systems (for single stars use the multiple star option with only one star. You can then compare the results with the [HZ Gallery](#) and the [HZ Calculator](#)). The methodology for calculating the HZ is described in Müller & Haghighipour (2014). The HZ can be calculated using the models by [Kopparapu et al \(2014\)](#) (assuming  $M_{\text{planet}} = 1 M_{\text{Earth}}$ ), [Kopparapu et al \(2013\)](#), [Selsis et al \(2007\)](#), or [Kasting et al \(1993\)](#). The stability radii in the binary cases are calculated using the formulae given by [Holman & Wiegert \(1999\)](#).

Movies of time-dependent habitable zones can be found at <http://astro.twam.info/hz-ptype> and <http://astro.twam.info/hz-multi>.

If you encounter any problems while using this website please contact [Tobias\\_Mueller@twam.info](mailto:Tobias_Mueller@twam.info).

You are welcome to use any of the figures created with this website in your papers, presentations and for teaching. In that case, we ask you that you kindly cite the paper [Müller & Haghighipour \(2014\)](#), and mention the URL address to the website.

Binary Multiple

Star A

Temperature 5780 K

Luminosity 1.0  $L_{\text{solar}}$

Mass 1.0  $M_{\text{solar}}$

Position X 0.0 AU

Position Y 0.0 AU

Render Clear

astro.twam.info/hz/#

Imagem retirada do site [//astro.twam.info/hz/].

É possível determinar a Zona Habitável para sistemas múltiplos e binários. Para este trabalho utilizamos a opção de sistemas múltiplos para calcular a Zona habitável de estrelas únicas, ou seja, que não apresentam uma companheira estelar. Não é necessário preencher os campos com a posição da estrela para que o programa funcione.

Figura 7 – Interface do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].]

Imagem retirada do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

Nessa etapa podemos determinar o modelo utilizado, o site conta com quatro opções, sendo estas os modelos propostos por Kasting *et al* 1993, Kopparapu *et al* 2013, Kopparapu *et al* 2014 e Selsis *et al* 2007. Logo abaixo é possível determinar a distância máxima (plot radius) e a resolução da imagem. Aconselhamos diminuir a distância para estrelas dos tipos M e K para melhor visualização.

Figura 8 – Interface do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].]

Imagem retirada do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

Após a determinação da Zona Habitável dos sistemas analisaremos então alguns dados como tamanho, massa, raio, variação orbital, distância da estrela, pressão, densidade, luminosidade, temperatura, radiação recebida e ciclos geoquímicos dos exoplanetas citados acima. Não é possível analisar todos os dados com a bibliografia disponível, dessa forma, utilizaremos os dados obtidos para criar uma estimativa da existência de água em estado

líquido na superfície do planeta. Fazendo isso é possível simplificar o problema, de forma que, consideramos possivelmente habitáveis apenas os exoplanetas que contenham água em sua superfície. Por último, analisaremos o sistema em que esses exoplanetas se encontram, procurando a existência de exoplanetas gigantes, do tipo Super Júpiteres e Super Netunos, e determinando qual o tipo de interferência que pode ser causada na habitabilidade de um exoplaneta pela existência desses exoplanetas gigantes.

## 4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 4.1 HABITABILIDADE

Chamamos de Zona Habitável [Huang 1959] ou de Ecosfera [Dole 1964], [Shklovsky e Sagan 1966] a região ao redor de uma estrela onde é possível encontrar planetas com suporte para a manutenção da vida. Estar dentro de uma zona habitável não faz com que o planeta seja de fato habitável, isso acontece porque existe uma série de restrições climáticas que devem ser satisfeitas para que o planeta em questão possa ser considerado habitável. Por exemplo [Dole 1964] define que um planeta habitável deve ter pelo menos 10% da sua superfície com uma temperatura que varie de  $0^{\circ}C$  a  $30^{\circ}C$  e que os extremos não podem ser maiores que  $-10^{\circ}C$  e  $40^{\circ}C$ . Já para [Rasool e Bergh 1970], [Hart 1978], [Kasting 1988] e [Whitmire, Reynolds e Kasting 1991], a presença de água em estado líquido é fundamental, dado que todos os organismos conhecidos precisam de água para se desenvolverem. Em [Fogg 1992], considerando ambas as definições, o autor utiliza o termo “biocompatível” para descrever planetas com água líquida em sua superfície e deixa o termo “habitável” para planetas que são favoráveis à sobrevivência de seres humanos.

Durante este trabalho utilizaremos o conceito de habitável descrito por [Kasting, Catling *et al.* 2003], dessa forma, deixamos explícito que o tipo de vida procurada é baseada em carbono e garante a necessidade de existir água líquida na superfície do planeta. A Zona Habitável, passa a ser então a região ao redor de uma estrela em que essas condições são satisfeitas e, por isso, a região mais apropriada para a existência de planetas habitáveis.

A existência de água líquida em um planeta está fortemente relacionada a sua pressão e temperatura, dessa forma, devem existir mecanismos capazes de realizar a manutenção da temperatura para que o planeta não seja demasiadamente quente ou frio. Os responsáveis por esse “controle” de temperatura são o efeito estufa e o albedo<sup>5</sup> que variam de acordo com algumas características do planeta. O albedo varia em função da distribuição de uma cobertura de gelo, neve e nuvens [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993], dessa forma, quanto maior for a cobertura de gelo no planeta, maior será o albedo e por consequência menor será temperatura. Ao contrário do efeito estufa que está intimamente relacionado com a atmosfera. Dependendo da densidade dessa atmosfera o calor absorvido da estrela fica retido no planeta, o que faz com que a temperatura aumente. Um modelo proposto por Dole caracteriza a Zona Habitável como a região ao redor do sol que se estende de  $0.725 \text{ UA}$  <sup>6</sup> à  $1.240 \text{ UA}$ . No entanto, esse resultado é obtido quando se considera

<sup>5</sup> Índice de refletividade. É a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela.

<sup>6</sup> Unidade Astronômica. Unidade de comprimento, aproximadamente a distância da Terra ao Sol, é igual a cerca de 150 milhões de quilômetros ou a aproximadamente 8 minutos luz

a atmosfera do planeta como opticamente fina e com albedo planetário fixo, o que impediria a variação de temperatura dentro do planeta. Esse modelo ignora o fato de que a atmosfera do planeta é espessa para a maior parte da radiação infravermelha, que resulta em um importante efeito estufa, e em uma variação do albedo.

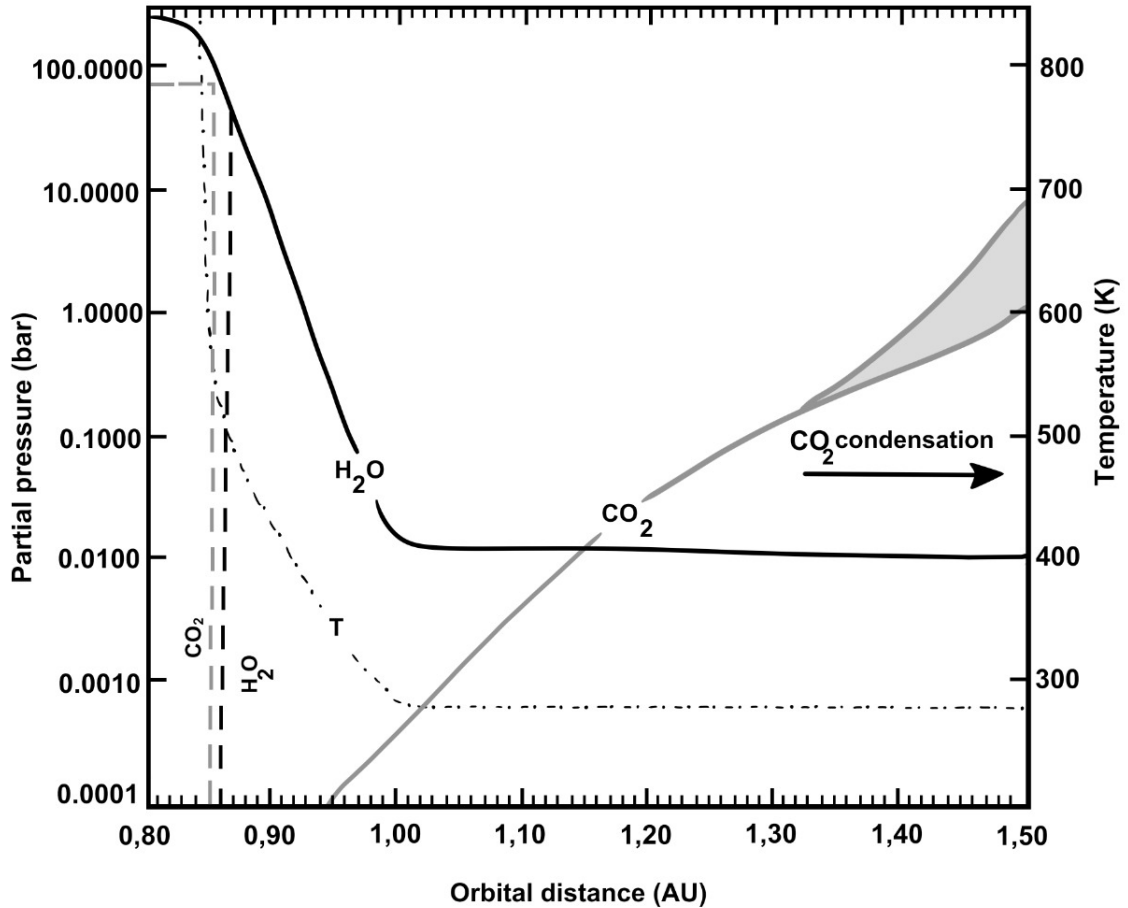
Em oposição ao modelo proposto por Dole, [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993], propõem um modelo que define os limites internos e externos da Zona Habitável nas posições orbitais de 0.95 UA e 1.37 UA respectivamente. A Zona Habitável definida por esse modelo leva em consideração a perda de água devido a fotólise,<sup>7</sup> para o limite interno, e a formação de nuvens de  $CO_2$  (Dióxido de Carbono) para determinar o limite externo.

Outra função muito importante do  $CO_2$  para a habitabilidade é a de controlar a intensidade do efeito estufa em conjunto com a  $H_2O$ , isso porque o efeito estufa se intensifica com o aumento da temperatura na superfície, que ocorre devido ao aumento do vapor de água na atmosfera. No caso de um planeta apresentar uma concentração de  $CO_2$  elevada, existe a probabilidade desse planeta apresentar uma atmosfera densa, como a de Vênus, o que faz com que a temperatura do planeta se eleve uma vez que grande parte da radiação absorvida ficará retida no planeta. Em oposição, o albedo é reforçado com as baixas temperaturas, o que aumenta a camada de gelo e neve. Em planetas cobertos por gelo, o índice de reflexividade é elevado, fazendo com que grande parte da energia seja refletida para o espaço e a temperatura do planeta diminua [Kasting, Catling *et al.* 2003]. A quantidade de  $CO_2$ , assim como a de  $H_2O$ , presente na atmosfera de um planeta semelhante a Terra, depende principalmente da sua distância orbital. Isso porque, no limite interno de uma HZ a  $H_2O$  pode estar em sua forma líquida na superfície do planeta, ou pode ter sido perdida para o espaço por meio da evaporação. Já o  $CO_2$  pode ser encontrado em qualquer região fora da HZ, incluindo seu limite externo. Com isso em mente, [Kaltenegger e Selsis 2007] alteraram os dados obtidos por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] e [Forget e Pierrehumbert 1997] e propuseram uma relação da pressão parcial de  $CO_2$  e  $H_2O$  e da temperatura de superfície em relação a distância orbital [Figura 6]. De acordo com Kaltenegger, quanto maior for a distância entre o planeta e a estrela, menor será sua temperatura, e maior será a concentração de  $CO_2$ . Assim como a temperatura, a concentração de  $H_2O$  também diminui, pois está evaporada e é perdida para o espaço.

Dessa forma, Kaltenegger propõem que para planetas com uma distância da sua estrela hospedeira menor que 0.93 UA, a  $H_2O$  se torna abundante na atmosfera, mas é perdida facilmente para o espaço através da fotólise por UV. Enquanto que em planetas com uma distância maior que 1.3 UA o  $CO_2$  presente na atmosfera condensa formando nuvens de  $CO_2$  que modificam a temperatura dando origem a um grande efeito estufa (*Runaway Greenhouse*) semelhante ao que acontece em Vênus.

<sup>7</sup> Processo de degradação de moléculas orgânicas por meio da radiação luminosa

Figura 9 – Relação da pressão parcial de  $CO_2$  e  $H_2O$  e da temperatura de superfície em relação a distância orbital



(adaptado de [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] e [Forget e Pierrehumbert 1997]).

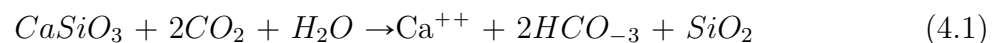
Segundo [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993], [Hart 1978] foi o primeiro autor a incluir a evolução estelar em um modelo de habitabilidade planetária. Para Hart, a Terra poderia ter vivido um efeito estufa descontrolado em algum momento de sua história caso tivesse se formado a uma distância de 0,95 UA do Sol, da mesma forma, poderia ter sofrido uma glaciação descontrolada se estivesse a uma distância de 1,01 UA do Sol. Analisando esses dois limites [Hart 1978] definiu como “Zona Habitável Contínua” (Continuously Habitable Zone – CHZ) a região ao redor de uma estrela que se mantém habitável por um intervalo de tempo finito.

## 4.2 ATMOSFERA

Para procurar por sinais de vida em outros planetas é necessário entender sua atmosfera, assim como seu raio e temperatura, isso porque o termo habitabilidade foi criado para descrever processos físico-químicos necessários para que o planeta seja capaz de manter uma temperatura maior que 273 K por um intervalo de bilhões de anos, sendo esse o tempo necessário para que a vida, do tipo corrente na Terra, possa evoluir. A atmosfera também é muito importante ao se determinar a quantidade de energia que o planeta consegue absorver e refletir, o que influenciará na sua habitabilidade.

Chamamos de atmosfera terrestre a camada composta por radiação, gás e material particulado <sup>8</sup> que envolve a Terra e se entende por milhares de quilômetros [Dias, Andrade-Neto e Miltao 2007]. É de extrema importância conhecer a composição química e o comportamento da atmosfera, já que ela é de relevância fundamental para os processos biológicos existentes, uma vez que os processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera são responsáveis por proteger os organismos da ação nociva que a exposição aos raios ultravioletas pode causar. A atmosfera, através da interação entre gases e componentes de radiação, é responsável por processos vitais da Terra, sendo um em particular a fotossíntese. Em relação a atmosfera terrestre, o  $CO_2$  e a  $H_2O$  são os gases mais importantes para o efeito estufa, que é responsável por regular a temperatura de superfície. Um link entre o nível de  $CO_2$  presente na atmosfera e a temperatura da superfície terrestre foi proposto primeiramente por [Walker, Hays e Kasting 1981] e depois revisado por [Kasting e Toon 1989], isso porque em escalas de tempo longas,  $t > 10^6$  anos, a concentração de  $CO_2$  presente na Terra é controlada através de interações lentas com uma reserva de rochas na crosta terrestre, esse processo é conhecido como ciclo do carbono-silicato.

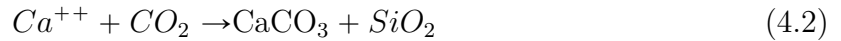
A fim de explicar esse ciclo, utilizaremos a  $CaSiO_3$  (wollastonita) como uma representante para todas as rochas de silicato, dessa forma a reação inicial do intemperismo por de ser descrita como:



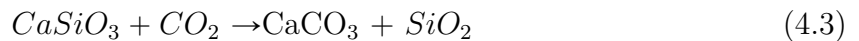
Essa reação ocorre naturalmente na presença de  $H_2O$  líquida e  $CO_2$ , é necessário que a temperatura e a pressão adequadas sejam mantidas para que o estado da água não se altere durante as reações. Os produtos do silicato dissolvidos pelo intemperismo são

<sup>8</sup> Aerossóis. Caracteriza-se pela suspensão de micropartículas sólidas ou líquidas em um gás

carregados pelos rios até o oceano, onde organismos usam esses produtos para construir conchas de carbonato de cálcio.



Nessa etapa, a vida não é necessária para se completar essa parte do ciclo do carbono silicato, isso porque quando os organismos morrem essas conchas são levadas ao fundo do mar, fazendo com que a maior parte delas seja dissolvida, mas algumas sobrevivem e se incorporam com os sedimentos de carbonato, assim a reação global pode ser descrita por:

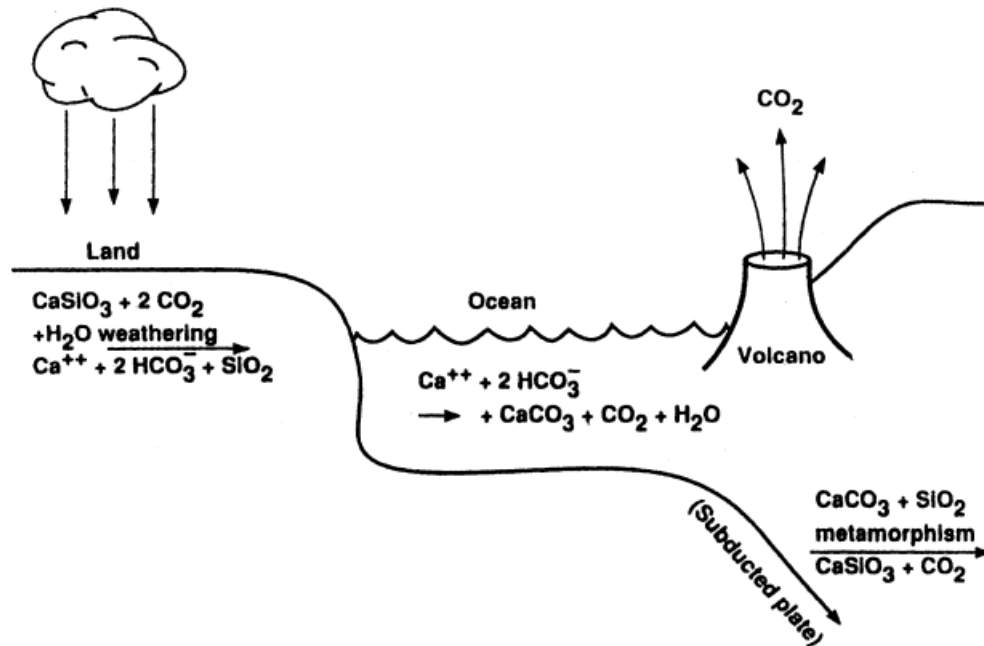


Apesar das reações causadas pelo intemperismo serem lentas, a taxa estimada do intemperismo do silicato é suficiente para remover todo o carbono combinado na atmosfera/oceano em aproximadamente 400 milhões de anos, no entanto, existem alguns processos que são capazes de restaurar o carbono do sistema para manter o estado de equilíbrio, esse processo é conhecido como metamorfismo, ele ocorre quando o solo marítimo é subduzido<sup>9</sup> e os sedimentos de carbonato são expostos a temperatura e pressão muito altas, isso faz com que a reação (4.3) seja revertida, dessa forma, o silicato de cálcio é reformado e o  $CO_2$  é devolvido para a atmosfera. Esse ciclo é capaz de repor todo o  $CO_2$  perdido em aproximadamente meio milhão de anos [Kasting, Catling *et al.* 2003]. É importante lembrar que a presença de água na superfície é essencial para que a reação (4.1) possa ocorrer.

O ciclo do carbono-silicato contém um feedback negativo, isso acontece por causa da dependência entre a taxa de intemperismo do silicato e da temperatura de superfície  $T_s$  [Kasting, Catling *et al.* 2003]. Existem dois fatores capazes de aumentar a taxa do intemperismo, sendo eles o efeito direto da temperatura sobre a taxa de reações

<sup>9</sup> Movimento convergente das placas tectônicas que se chocam, causando o afundamento da placa mais densa e fazendo a placa mais leve ascender

Figura 10 – Diagrama ilustrando o ciclo do carbono-silicato, também conhecido como ciclo do carbono inorgânico.



[Kasting, Catling *et al.* 2003]

químicas e o porquê das taxas de evaporação e precipitação se amplificarem com o aumento da temperatura. Como o intemperismo do silicato é um processo que resulta na perda de  $\text{CO}_2$  atmosférico, as concentrações de  $\text{CO}_2$  tendem a cair com o aumento da temperatura de superfície ( $T_s$ ), ao contrário do que acontece com as moléculas de  $\text{CO}_2$  que aumentam conforme a  $T_s$  diminui. O tempo necessário para esse ciclo de retroalimentação é semelhante do ciclo do carbono-silicato, centenas de milhares ou até milhões de anos, isso faz com que ele seja muito lento para neutralizar o efeito estufa, mas rápido o suficiente para ter um efeito dominante na escala de tempo da evolução planetária.

Outro fator que pode influenciar a temperatura de um planeta é a presença de aerossóis em sua atmosfera. Isso acontece porque esses aerossóis em contato com a água se aglomeram e formam gotículas que compõem as nuvens. Quanto maior for o número de aerossóis, maior será a quantidade de nuvens presentes na atmosfera do planeta, o que influenciará a sua temperatura, uma vez que a presença de nuvens aumenta o albedo planetário, fazendo com que a temperatura de superfície diminua, isso acontece porque as nuvens refletem a radiação emitida pela estrela.

#### 4.3 TEMPERATURA

Outro fator importante ao se determinar a habitabilidade de um exoplaneta é a sua temperatura, isso porque é necessário que o planeta esteja distante o suficiente da sua estrela hospedeira para que a radiação absorvida seja intensa o suficiente para

manter água em estado líquido em sua superfície sem iniciar um processo de *runaway greenhouse*. Como a principal fonte de energia térmica de um planeta vem da radiação estelar, dependendo do tipo de estrela, nesse caso especificamente as estrelas do tipo G, K e M, o planeta receberá um fluxo de radiação diferente que irá aquecer sua superfície. A radiação emitida pela estrela pode ser absorvida ou refletida pela atmosfera do planeta, a luminosidade absorvida pela atmosfera e pela superfície se refere a energia que entra no planeta, já a luminosidade refletida se refere a energia que sai do planeta. O efeito estufa e o albedo de um planeta estão diretamente relacionados a quantidade de energia absorvida ou refletida pelo planeta, isso porque quanto maior for a concentração de  $CO_2$  e  $H_2O$ , gases principais do efeito estufa presentes na atmosfera, mais lentamente o calor absorvido será perdido para o espaço, o que resulta em uma temperatura de superfície mais alta. De forma semelhante, quanto maior for o albedo de um planeta, maior será a quantidade de energia refletida de volta para o espaço, o que acaba resultando em uma temperatura de superfície menor.

De acordo com [Kasting, Catling *et al.* 2003]. Se tratarmos a Terra como um corpo negro com temperatura efetiva  $T_{eff}$ , a condição de um balanço de energia planetário pode ser descrita por:

$$\sigma T_{eff}^4 = \frac{S}{4}(1 - A) \quad (4.4)$$

Onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann<sup>10</sup>,  $S$  é a constante solar<sup>11</sup> e  $A$  ( $\approx 0.367$ ) é o albedo planetário. Resolvendo essa equação temos que a temperatura efetiva é de aproximadamente  $250K$ . Logicamente, a Terra não é um corpo negro, ao invés disso, ela apresenta uma atmosfera que aquece a superfície do planeta através do efeito estufa, dessa forma a temperatura de superfície média global é de  $288K$ , e a diferença entre  $T_{eff}$  e  $T_s$  é a magnitude do efeito estufa.

$$\Delta T_g \approx T_s - T_{eff} = 38K \quad (4.5)$$

Quando o planeta atinge um certo equilíbrio, sua temperatura efetiva não varia mais, isso porque, quando esse equilíbrio é alcançado a quantidade de radiação absorvida e radiação refletida estão balanceadas. A principal dificuldade ao se utilizar as expressões

<sup>10</sup> ( $5.67 * 10^{-8} W/m^2/k^4$ ) é a constante de proporcionalidade na lei de Stefan-Boltzmann, a energia emitida por um corpo negro por unidade de área e unidade de tempo é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo

<sup>11</sup>  $1390W/m^2$  fluxo de radiação solar recebido na Terra

acima é a determinação do albedo planetário, isso porque a maior parte do albedo é causado pela reflexão das nuvens presentes na atmosfera. Hoje é possível observar e parametrizar as propriedades das nuvens presentes na atmosfera da Terra, mas é difícil determinar essas propriedades para outros planetas, ou até mesmo, para uma “Terra jovem” e por isso, cálculos climáticos envolvendo exoplanetas estão sujeitos a apresentarem incertezas. Na Tabela 1 estão listadas a temperatura de superfície da Terra e dos planetas estudados, no caso do planeta Pi men c não foi possível encontrar um valor oficial, então o valor listado é referente ao disponibilizado pelo catálogo de planetas extrasolares produzido pela universidade de Kyoto, através da equação de corpo negro.

Tabela 1 – Temperatura de superfície da Terra em relação a dos planetas estudados.

Planeta	$T_s$
<b>Terra</b>	$288K$
Wolf 1061c	$306K$
Gj 682b	$271,5K$
Kepler 452b	$265K$
Kepler 440b	$320,9K$
Pi men c	$1147.0K$

Produzida pelos autores. Os dados foram retirados dos catálogos de exoplanetas [[Exoplanete.eu](http://Exoplanete.eu)] e [[Kyoto University](http://Kyoto University)].

Outro fator capaz de influenciar na temperatura de exoplanetas são os feedbacks climáticos, que funcionam como um controle de temperatura. Um exemplo de feedback climático é a presença de vapor de água na atmosfera terrestre, isso porque esse vapor apresenta um comportamento diferente do  $CO_2$  por estar perto da sua temperatura de condensação. O feedback obtido pelo vapor de água é quase instantâneo, dessa forma, se o clima esfria a quantidade de vapor de água presente na atmosfera decresce o que faz com que o efeito estufa diminua e aconteça um resfriamento adicional. O caso oposto acontece quando o clima esquenta, fazendo com que a quantidade de vapor de água presente na atmosfera cresça e por consequência com que o efeito estufa aumente, o que acaba amplificando o calor inicial.

#### 4.4 VARIAÇÕES NOS CICLOS ORBITAIS E SUAS RESPOSTAS CLIMÁTICAS

Através da investigação da dinâmica de exoplanetas em relação a sua Zona Habitável, [[Asghari et al. 2004](#)] propôs que variações na excentricidade ( $e$ ) de um planeta poderiam afetar a distribuição da insolação recebida por este. Isso faz com que a excentricidade seja um importante indicativo da habitabilidade de um planeta rochoso dentro de uma Zona Habitável, onde, qualquer valor de  $e > 0.2$  é responsável por gerar uma diferença de temperatura significativa na superfície do planeta [[Asghari et al. 2004](#)].

Caso um planeta apresente uma órbita circular, este recebe radiação de forma homogênea durante todo o seu movimento. Entretanto, se considerarmos um planeta com

órbita elíptica, ou seja, um planeta que durante sua translação apresente uma variação entre seu periastro e apoastro. A radiação recebida pelo planeta no apoastro será menor que a recebida durante o periastro. O que pode resultar em variações na temperatura do planeta.

Planetas que se encontram mais próximos de sua estrela hospedeira apresentam órbitas compactas, de forma que, caso exista uma variação na excentricidade, os efeitos na temperatura são observados mais rapidamente. Entretanto, caso o planeta esteja distante da sua estrela hospedeira, a órbita descrita por esse planeta é maior, o que faz com que variações na excentricidade, caso existam, tendam a demorar mais para causar mudanças drásticas na temperatura. Para planetas dentro de uma Zona Habitável, mudanças na excentricidade podem fazer com que em algum momento da sua translação o planeta saia da HZ. Caso o planeta esteja fora da HZ, a variação da excentricidade pode ser o suficiente para que ele se encontre dentro da HZ durante alguns momentos.

A excentricidade na órbita de um planeta pode ser causada por diversos motivos, sendo o mais comum a perturbação de outros corpos no espaço, principalmente planetas. No caso das Super Terras, essas variações podem ser causadas por planetas gigantes que estejam perto o suficiente para que sua órbita cause interferências na órbita da ST gerando uma variação na excentricidade. Na tabela abaixo se encontra uma comparação da excentricidade da Terra em relação a dos planetas estudados.

Tabela 2 – Excentricidade da Terra em relação a dos planetas estudados.

Planeta	$e$
<b>Terra</b>	<b>0,0167</b>
Wolf 1061c	0,11
Kepler 452b	0,035
Kepler 440b	0,34
Gj 682b	0,08
Pi men c	0,15

Produzida pelos autores. Os dados foram retirados dos catálogos de exoplanetas [[Exoplante.eu](#)] e [[Kyoto University](#)].

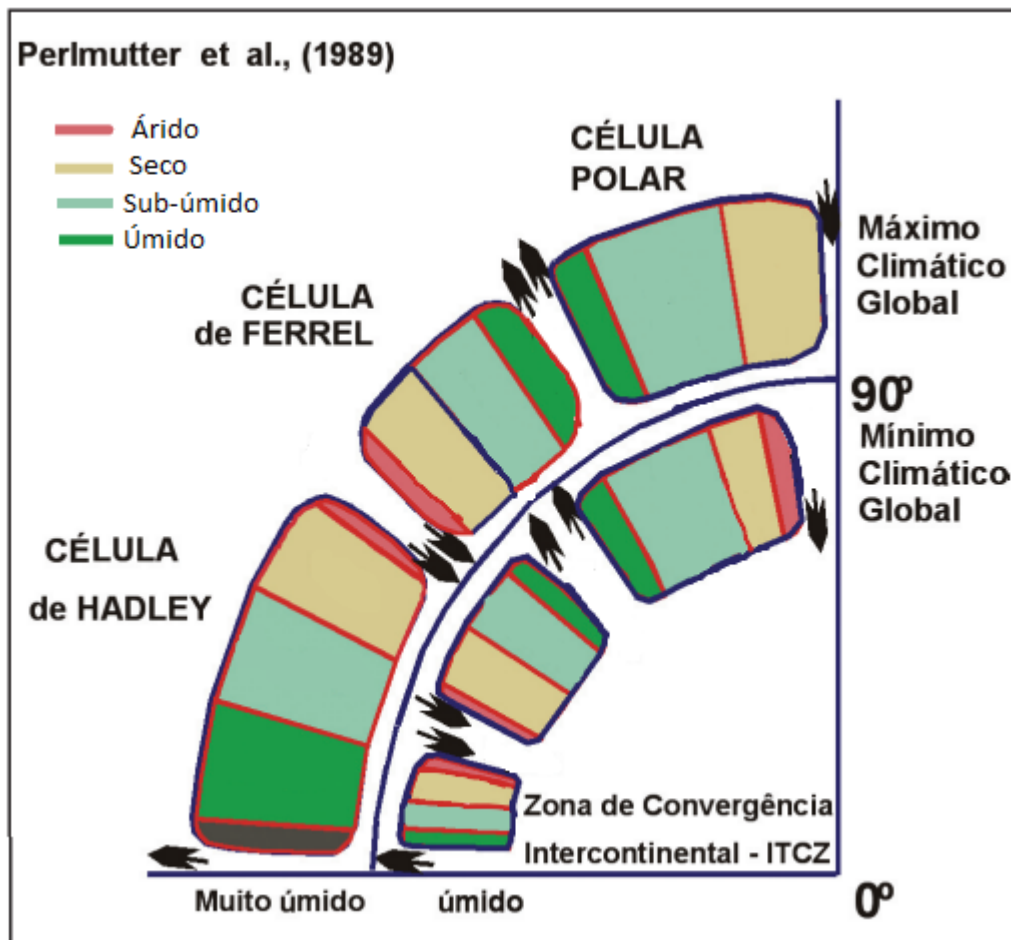
Embora a excentricidade seja uma das principais responsáveis por mudanças na temperatura de um planeta, a precessão tem um papel muito importante nos ciclos sazonais de insolação, isso porque devido a precessão do eixo e de outros movimentos astronômicos, as posições do solstício e equinócio se deslocam lentamente ao longo da órbita elíptica da Terra, fazendo com que os efeitos sazonais sejam mais extremos em um hemisfério e menos em outro.

Mudanças na sazonalidade da insolação podem causar alterações no padrão de temperatura regional. A atmosfera acomoda mudanças no aquecimento através do ajuste da distribuição de células de pressão atmosférica e dos padrões de circulação, combinando as mudanças de temperatura, pressão e circulação, os padrões de precipitação e evaporação

também são alterados, criando mudanças nos padrões de climas associados gerando ciclos climáticos [PERLMUTTER e FILHO 2005].

Através da superposição e da interação de ciclos orbitais, um espectro repetitivo de climas de alta frequência é criado, esses ciclos de alta frequência são limitados por máximos e mínimos de baixa frequência. Esses máximos e mínimos também são responsáveis por indicarem os intervalos mais quentes e frios do planeta, sendo muitas vezes associados a períodos de glaciação e interglaciação. Os máximos e mínimos climáticos são capazes de alongar ou encurtar as células de circulação <sup>12</sup>, as quais definem os padrões sazonais de dinâmica atmosférica <sup>13</sup>.

Figura 11 – Definição dos cinturões de alta e baixa pressão gerados pelas células de circulação nas condições de máximo e mínimo climático.

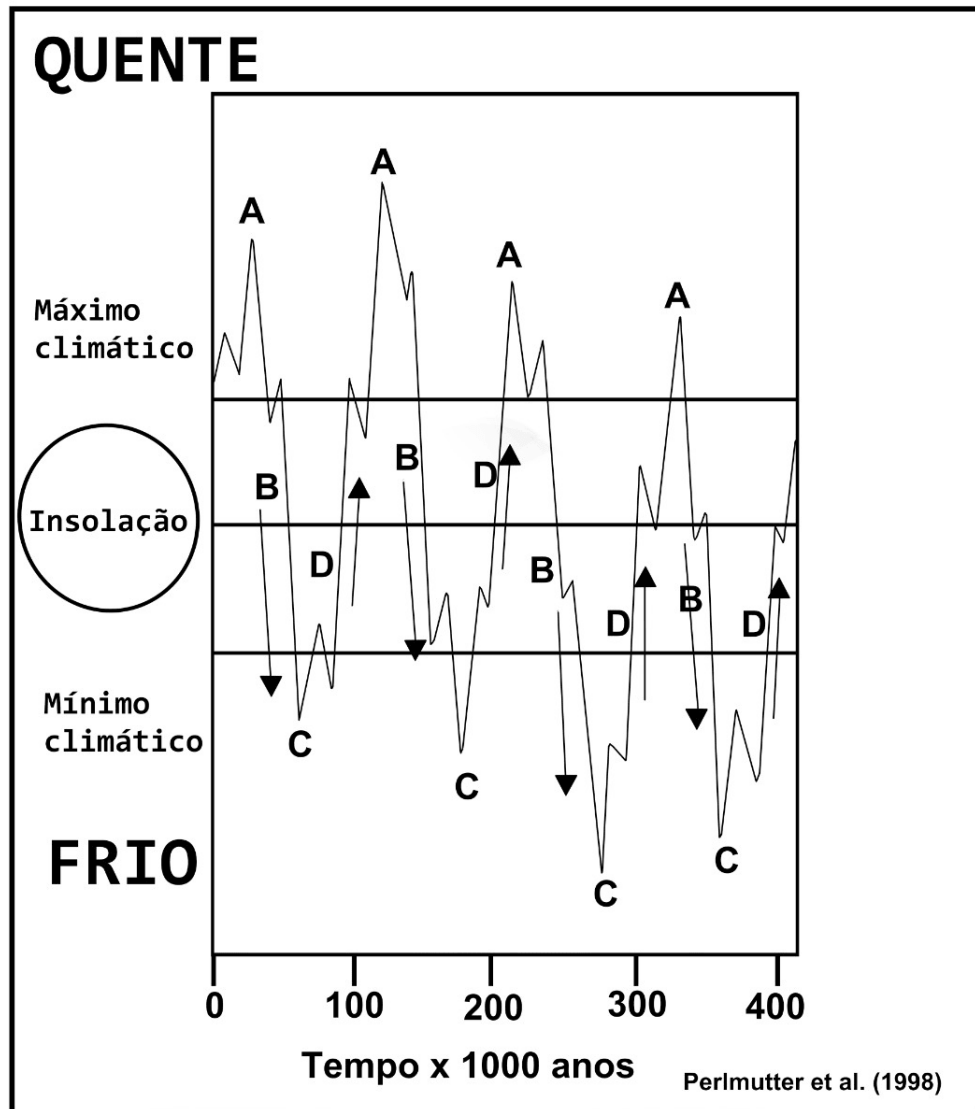


[PERLMUTTER e FILHO 2005]. Modificado de [Perlmutter, Radovich e Matthews 1997]

<sup>12</sup> Células de movimentação, responsáveis pela ocorrência dos ventos e pelas variações climáticas.

<sup>13</sup> Responsável pela variabilidade climática.

Figura 12 – Máximos e mínimos climáticos causados pela interferência dos ciclos orbitais nos últimos 400 mil anos.



[PERLMUTTER e FILHO 2005]. Modificado de [Perlmutter, Radovich e Matthews 1997].

#### 4.5 WOLF 1061C

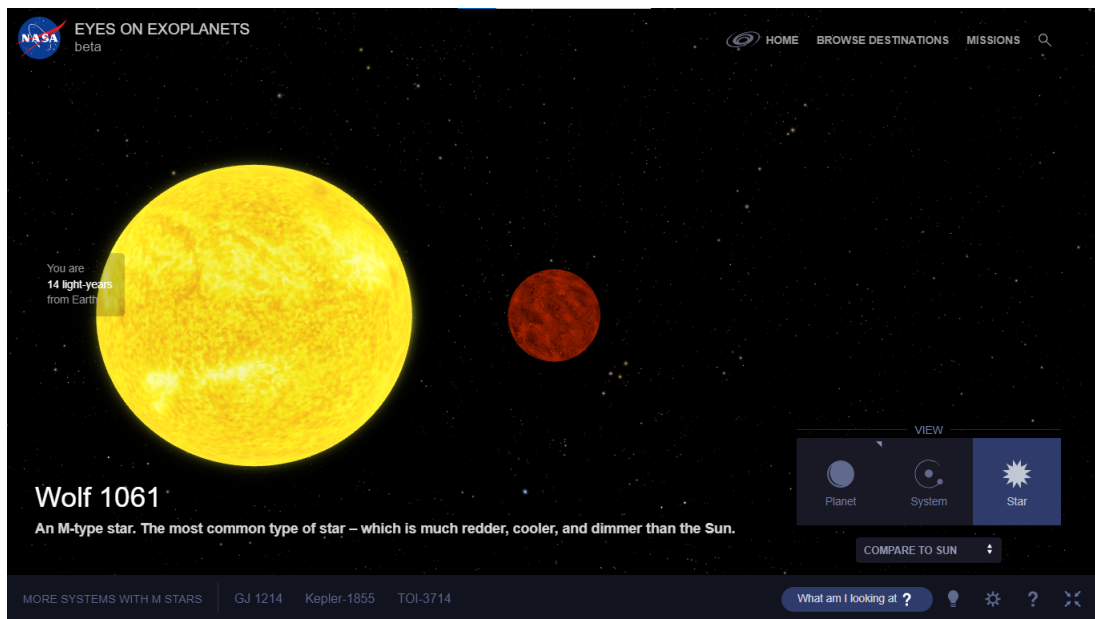
Estrelas do tipo M se encontram na parte inferior da sequência principal, isso porque são estrelas pequenas, frias e com pouco brilho. A zona onde planetas rochosos são formados está muito próxima da estrela, o que faz com que seja mais fácil identificar planetas menores e mais frios. Por exemplo, um planeta com a massa da Terra na zona habitável de uma estrela do tipo M é capaz de gerar uma variação na velocidade radial que é de uma ordem de magnitude maior do que a que a Terra gera no sol.

Wolf 1061, também conhecida como GJ 628, é uma estrela do tipo espectral

M3V, uma anã brilhante. Através da análise fotométrica sazonal de Wolf 1061 o período de rotação da estrela é de  $89,3(\pm 1,8)$  dias, que é um valor consistente com o período de 93 dias encontrado por [Astudillo-Defru *et al.* 2017] a partir da análise das linhas de emissão do  $C_a$ ,  $H$  e  $K$ . Utilizando o trabalho cinemático proposto por [Newton *et al.* 2016] para as anãs M, o período de rotação sugere que Wolf 1061 tenha uma idade maior que 5 Gyr [Wright *et al.* 2016].

A [figura 10] contém uma representação feita pelo programa NASA's Exoplanet Exploration Program de como é a estrela Wolf 1061. Utilizando uma ferramenta fornecida pelo site, é possível colocar o sol ao lado dessa estrela e assim comparar o tamanho, cor e brilho entre eles. Essa ferramenta será utilizada mais a frente para comparar o sistema planetário de Wolf 1061 com o sistema solar. A [figura 11] contém uma representação do exoplaneta Wolf 1061c ao lado da Terra.

Figura 13 – Representação da estrela Wolf 1061 ao lado do Sol.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

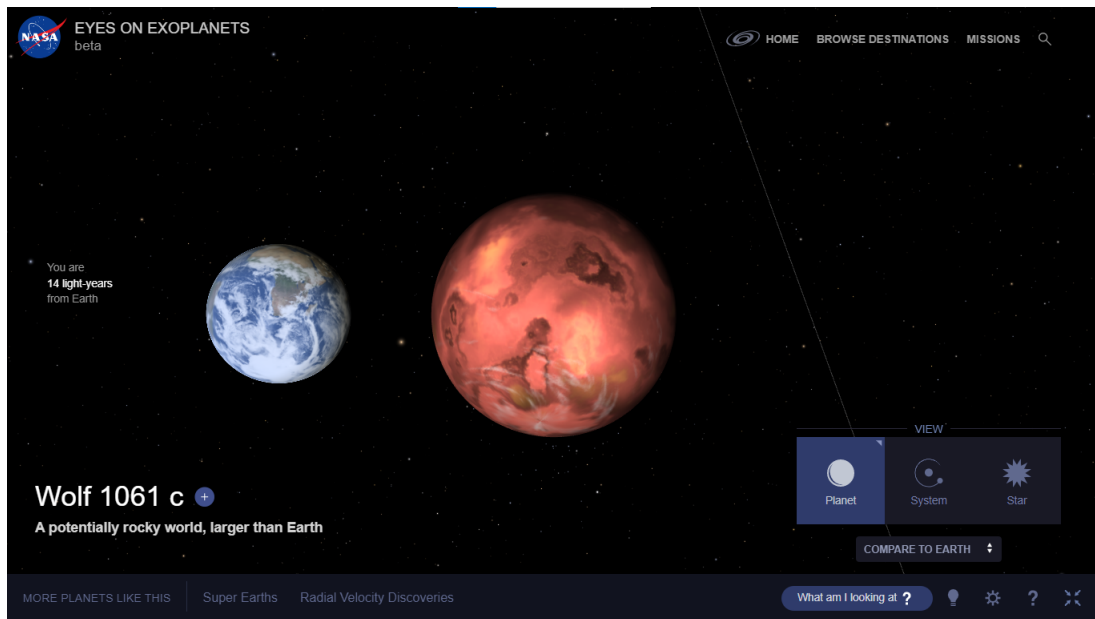
Por meio do método de velocidade radial, foram encontrados indícios que indicam a presença de três planetas rochosos orbitando ao redor da estrela. Na tabela abaixo estão dados como massa, raio e excentricidade desses planetas, assim como da própria estrela. Os dados foram obtidos por meio do catálogo de exoplanetas [Exoplante.eu] e pelo catálogo de exoplanetas fornecido pela universidade de Kyoto [Kyoto University].

Tabela 3 – Dados dos planetas orbitando a estrela Wolf 1061.

Estrela	M	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsec <sup>14</sup> )
Wolf 1061	0,25 $M_{\odot}$	0,3207 $R_{\odot}$	0,01102 $L_{\odot}$	3305,0	4,3
Planeta		$e$	P (dias)		Semieixo maior (UA)
Wolf 1061b	1,9 $M_T$	0,15	4,88	449,1	b0,0375
Wolf 1061c	3,41 $M_T$	0,11	17,87	306	0,089
Wolf 1061d	7,7 $M_T$	0,55	217,21	126,9	0,47

Produzida pelos autores. Os dados foram retirados dos catálogos de exoplanetas [Exoplante.eu] e [Kyoto University].

Figura 14 – Representação do exoplaneta Wolf 1061c ao lado da Terra.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

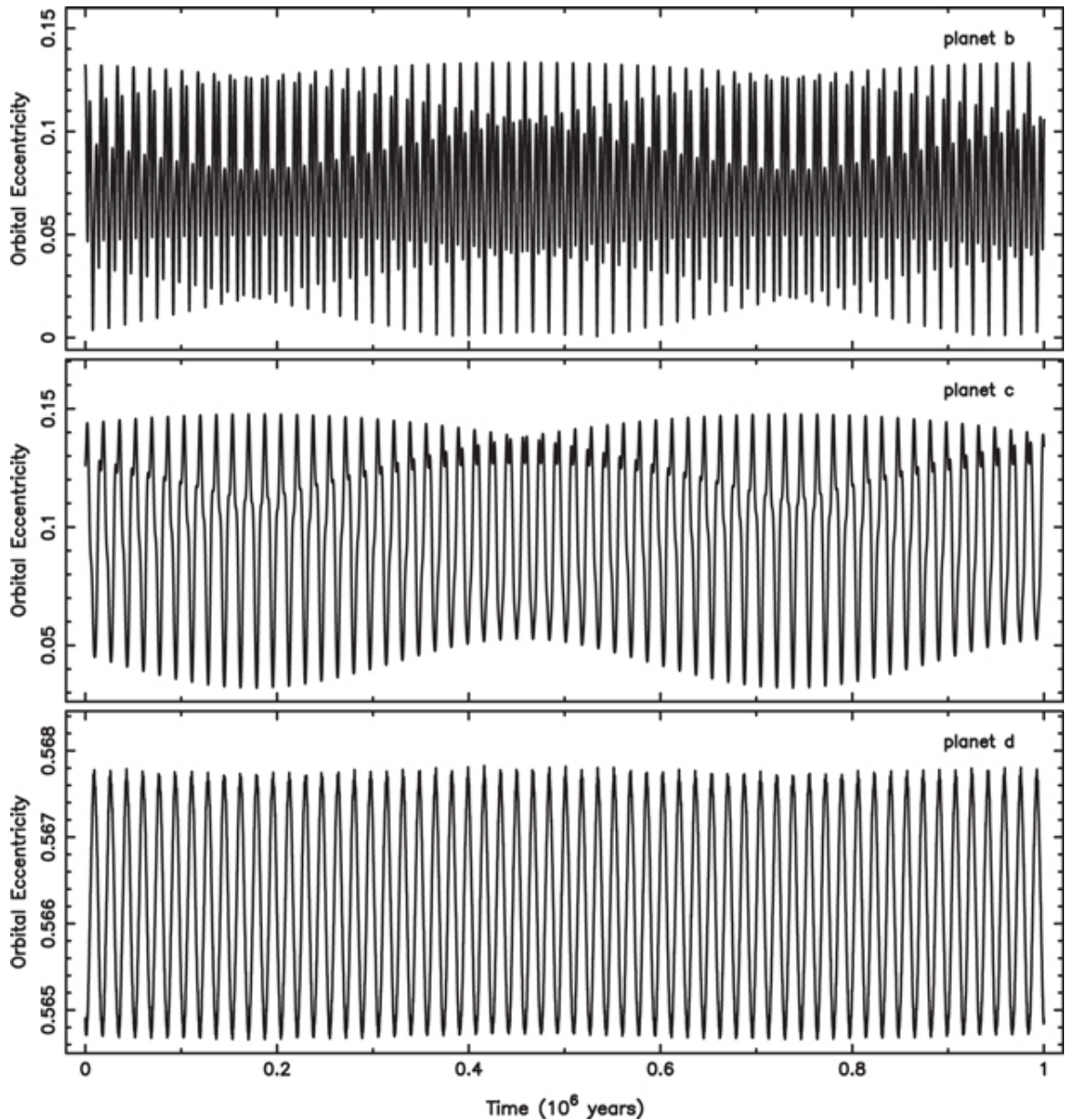
O exoplaneta Wolf 1061c é de particular interesse por ter massa suficientemente pequena para ser rochoso e estar dentro da Zona Habitável da estrela anã hospedeira, por causa de seu período de 17,87 dias o planeta pode apresentar uma rotação síncrona com sua estela hospedeira causada pelas forças de maré. Nesse caso, apenas um lado do planeta é iluminado diretamente pela estrela, enquanto o outro lado permanece sem luz, isso faz com que a diferença de temperatura entre o lado iluminado e o lado escuro seja muito grande, de forma que a parte habitável do planeta esteja localizada na linha divisória entre esses dois extremos.

A dinâmica orbital dos planetas em função do tempo desempenha papel fundamental na habitabilidade do sistema. [Kane *et al.* 2017] utilizou o programa *Mercury integrator package*<sup>15</sup> [Chambers 1999] para realizar uma simulação a fim de verificar a estabilidade e dinâmica orbital do sistema. Wolf 1061 foi considerado estável durante toda a simulação de  $10^7$  anos. Na [figura 12] é mostrada a evolução da excentricidade para os

<sup>15</sup> Software utilizado para realizar integrações orbitais afim de determinar a dinâmica do sistema orbital.

três planetas pertencentes ao sistema para um período de  $10^6$  anos.

Figura 15 – Componente de excentricidade da dinâmica orbital dentro do sistema Wolf 1061, mostrado para os planetas b, c e d (painéis superior, central e inferior, respectivamente).



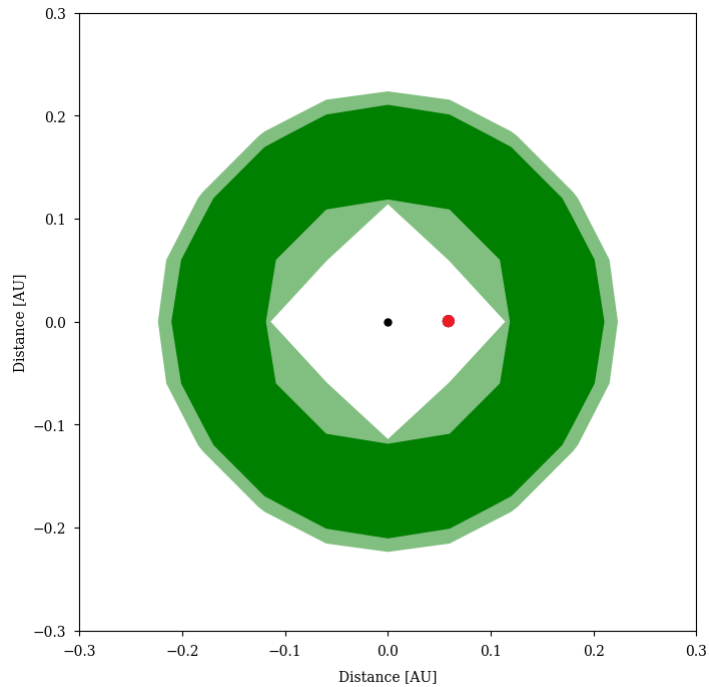
[Kane *et al.* 2017].

A interação entre os dois planetas mais próximos da estrela, painéis superiores, é mais pronunciada, com excentricidades médias muito abaixo dos valores iniciais de  $e_b = 0,132$  e  $e_c = 0,126$ . Já a amplitude da variação da excentricidade para o planeta mais distante, painel inferior, é insensível a presença dos planetas internos e permanece próxima ao valor inicial de  $e_d = 0,656$ . A excentricidade do planeta b reduz para quase circular em intervalos regulares, enquanto a excentricidade do planeta c cai para valores tão baixos quanto  $\approx 0,03$ . Embora a excentricidade de um planeta dentro de uma Zona Habitável afete sua temperatura, esse fato não necessariamente exclui a presença de água líquida

na superfície do planeta, pois as condições exigidas para a presença de água também dependem de fatores como composição atmosférica e variações no fluxo solar incidente.

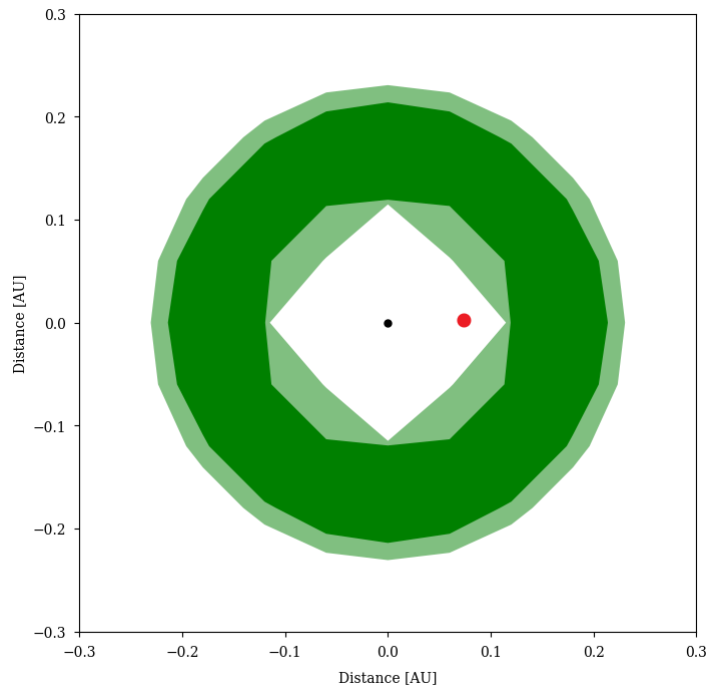
As imagens abaixo foram construídas através do método utilizado por [Müller e Haghighipour 2014] para calcular a Zona Habitável através do site [//astro.twam.info/hz/], utilizando os modelos propostos por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] e [Kopparapu *et al.* 2013], dessa forma, em ambos os casos a Zona Habitável conservadora do sistema planetário Wolf 1061 é descrita pela faixa verde escura, enquanto uma visão otimista abrange as faixas em verde claro.

Figura 16 – Zona Habitável do sistema planetário Wolf 1061 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Wolf 1061c.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [//astro.twam.info/hz/].

Figura 17 – Zona Habitável do sistema planetário Wolf 1061 pelo modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Wolf 1061c.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)]

A borda interna da HZ otimista proposta por [Kopparapu *et al.* 2013] é mais extensa do que a proposta por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] pois se trata de uma estimativa empírica conhecida como “Vênus recente”, que se baseia na inferência de que Vênus não tem água líquida em sua superfície a pelo menos 1 bilhão de anos [Solomon *et al.* 1991], enquanto o modelo proposto por Kasting utiliza o limite de “perda de água” para determinar a borda interna da Zona Habitável.

Já o limite para a borda externa proposta por Kopparapu utiliza uma estimativa empírica correspondente conhecida como “jovem Marte”, que se baseia na inferência de que Marte tinha água líquida em sua superfície a 3,8 milhões de anos, enquanto o modelo de Kasting se baseia no limite da “primeira condensação do  $CO_2$ ”.

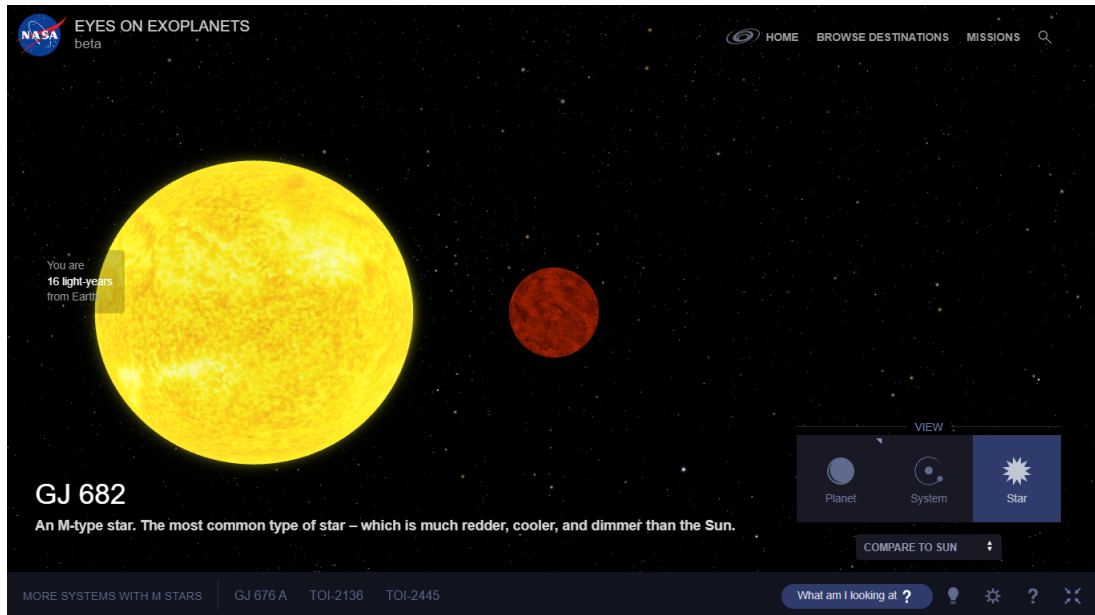
Com um semieixo maior de  $0,089(-0,0031; +0,0029)$  AU, Wolf 1061c está próximo da borda interna da sua HZ, fazendo com que o planeta possa apresentar uma atmosfera mais semelhante a de Vênus, com um efeito estufa descontrolado. Com uma atmosfera semelhante à de Vênus e com a excentricidade frequentemente se aproximando de zero, fazendo com que a órbita se encontre completamente interna a Zona Habitável otimista, é improvável a existência de água líquida na superfície do planeta.

## 4.6 GJ 682B

Gj 682, também conhecida como Gliese 682, é uma estrela do tipo espectral  $M3V$ . O período de rotação da estrela GJ 682 é de 17,48 dias, não é possível determinar a idade da estrela.

Através do método de velocidade radical foram encontrados dois planetas rochosos orbitando ao redor da estrela, na tabela 4 estão dados como massa, raio e excentricidade desses planetas, assim como da própria estrela. Os dados foram obtidos por meio do catálogo de exoplanetas [Exoplante.eu] e pelo catálogo de exoplanetas fornecido pela universidade de Kyoto [Kyoto University].

Figura 18 – Representação da estrela GJ 682 ao lado do Sol.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

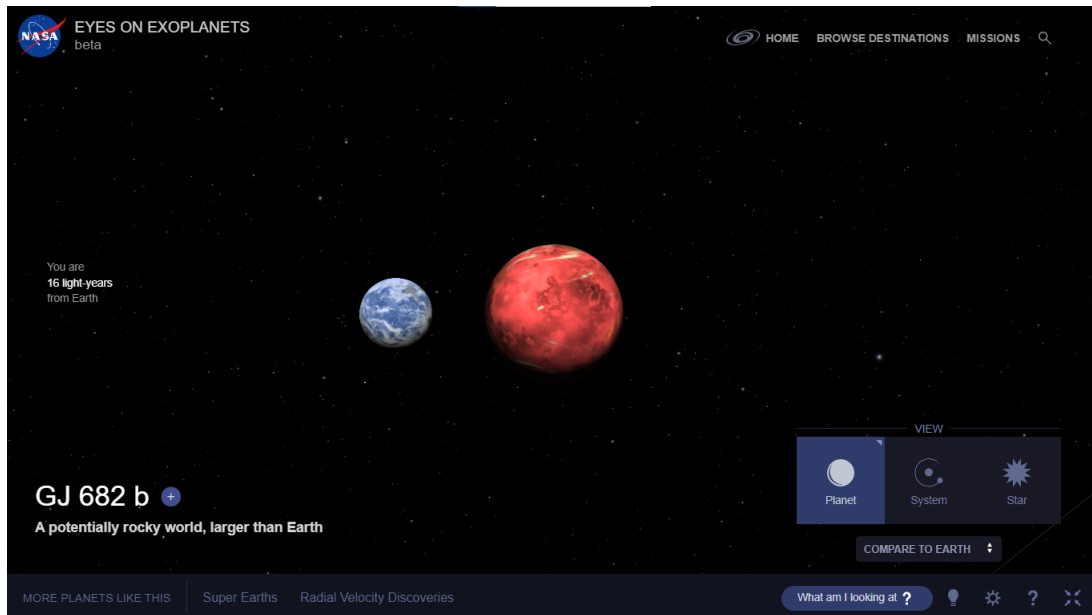
Tabela 4 – Dados dos planetas orbitando a estrela GJ 682.

Estrela	M	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsec)
GJ 682	$0,27 M_{\odot}$	$0,258 R_{\odot}$	$0,008 L_{\odot}$	3028	5,07
Planeta		$e$	P (dias)		Semieixo maior (UA)
GJ 682b	$4,4 M_T$	0,08	17,48	271,5	0,080
GJ 682c	$8,7 M_T$	0,10	57,32	183	0,176

Produzida pelos autores. Os dados foram retirados dos catálogos de exoplanetas [Exoplante.eu] e [Kyoto University].

De forma semelhante a Wolf 1061c, pertencente ao sistema descrito anteriormente, GJ 682b também pode apresentar uma rotação síncrona com sua estrela por causa do seu período de 17,48 dias fazendo com que a temperatura de superfície seja maior em um dos lados do planeta.

Figura 19 – Representação do exoplaneta GJ 682b ao lado da Terra.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

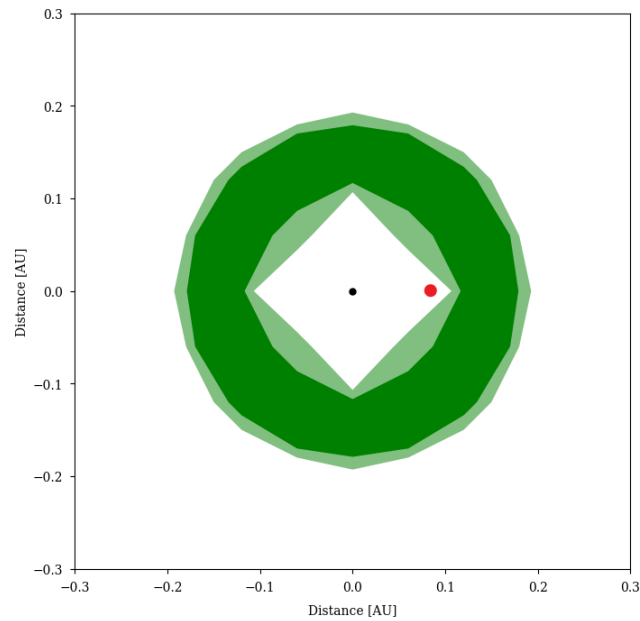
Outro fator capaz de influenciar a temperatura de superfície de um planeta é a sua taxa de rotação, isso acontece porque a taxa de rotação planetária é responsável por determinar a intensidade do efeito de Coriolis<sup>16</sup> [Yang *et al.* 2014]. A força de Coriolis é um parâmetro chave para determinar a circulação atmosférica, isso porque, quando a força de Coriolis é forte as células de circulação latitudinais, células de Hadley, se restringem a baixas latitudes a atmosfera se organiza em regiões com faixas longitudinais simétricas. Mas, caso a intensidade da força de Coriolis seja fraca, os gradientes horizontais de temperatura diminuem em toda a atmosfera fazendo com que as células de Hadley possam se estender por todo o globo.

A distribuição da temperatura de superfície, responsável por impulsionar a circulação atmosférica, é determinada pela combinação da duração do dia com a inércia térmica superficial e atmosférica. Para uma grande inércia térmica, dias curtos, a diferença na temperatura de superfície entre o dia e a noite é pequena. No caso de uma pequena inércia térmica, os dias são longos o suficiente para que o lado iluminado seja muito mais quente que o lado que não recebe iluminação direta e a circulação atmosférica é caracterizada pela ascensão da temperatura no lado diurno e queda de temperatura no lado noturno. Para planetas bloqueados por maré orbitando estrelas do tipo M, uma ascensão

<sup>16</sup> O efeito Coriolis é uma força inercial que age sobre corpos que estão em movimento em um referencial não inercial que, em relação a um referencial inercial, possui movimento de rotação.

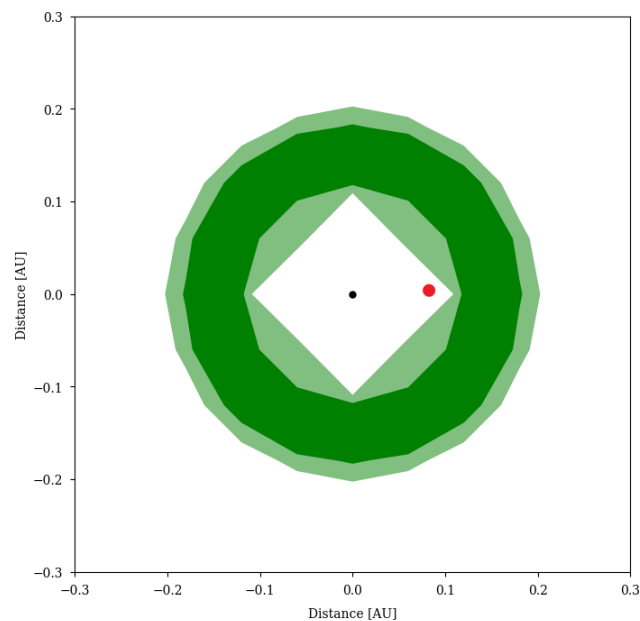
atmosférica no lado iluminado resulta em uma cobertura de nuvens espessa, aumentando o albedo planetário. A Zona Habitável do planeta GJ 682b calculada através do método de [Müller e Haghighipour 2014] é apresentada nas imagens abaixo.

Figura 20 – Zona Habitável do sistema planetário GJ 682 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta GJ 682b.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

Figura 21 – Zona Habitável do sistema planetário GJ 682 pelo modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta GJ 682b.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

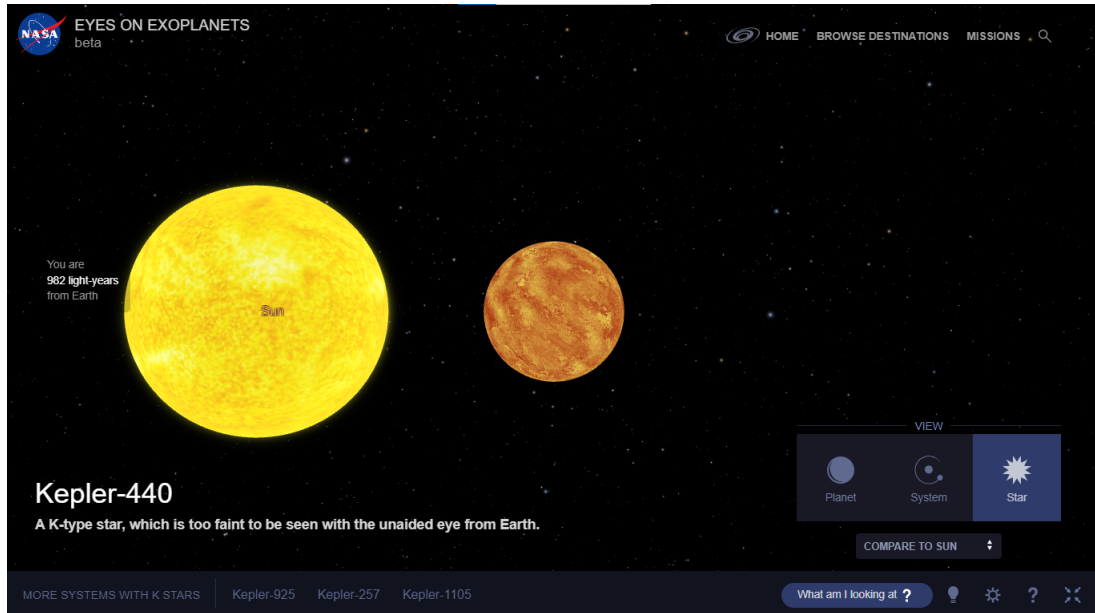
Com uma órbita quase circular e um semieixo maior de 0,080 UA é possível que o planeta passe por períodos fora da Zona Habitável de sua estrela.

#### 4.7 KEPLER 440B

Estrelas de sequência principal do tipo K, também conhecidas como anãs do tipo K ou anãs laranjas, são estrelas de tamanho médio encontradas entre as anãs vermelhas e estrelas do tipo G que emitem uma luz amarela/branca. Sua massa varia de 0,5 a 0,8  $M_{\odot}$  e sua temperatura de superfície entre 3.900 e 5.200 K. Essas estrelas são um alvo particularmente promissor na busca por vida fora da Terra por serem estáveis e por ter tempo de vida maior que o do sol, o que torna possível a evolução da vida caso ela exista.

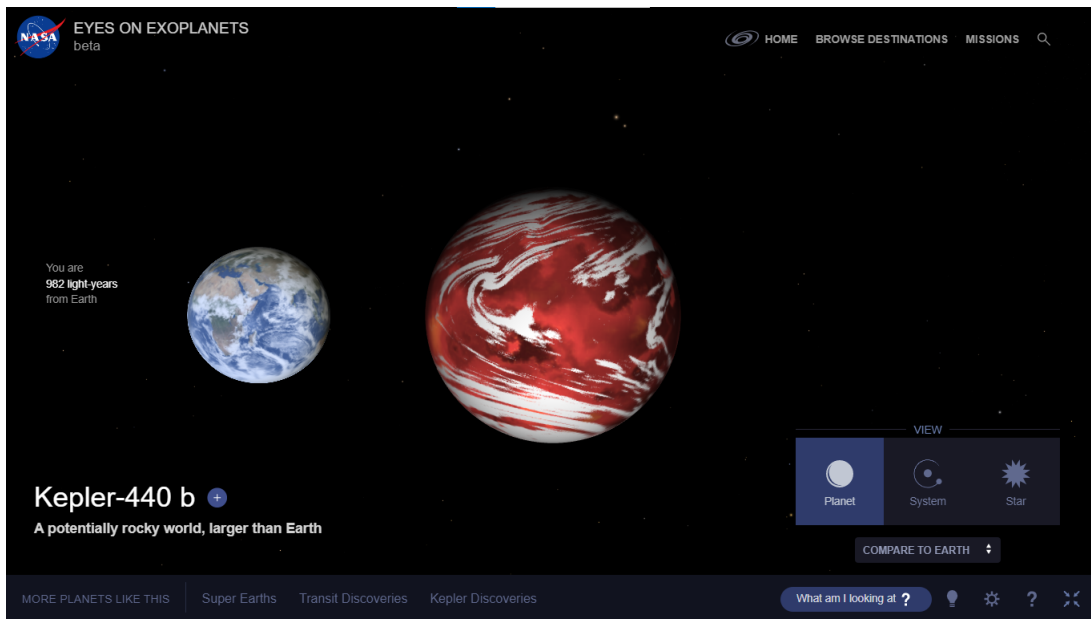
Kepler 440, também conhecido como KOI-4087.01 ou KIC 6106282 é uma estrela do tipo espectral  $K6V$ , uma anã laranja. Não foi possível encontrar um valor de luminosidade da estrela na bibliografia, por isso vamos utilizar o valor de  $0,117(-0,024; +0,0)vL_{\odot}$  referente a estrela Kepler 442 para calcular a Zona Habitável. Não foi possível encontrar o período de rotação da estrela e se estima que seja uma estrela com aproximadamente  $1,3(-0,6; +0,2)$  Gyr

Figura 22 – Representação da estrela Kepler 440 ao lado do Sol.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Figura 23 – Representação do exoplaneta Kepler 440b ao lado da Terra.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Tabela 5 – Dados dos planetas orbitando a estrela Kepler 440.

Estrela	M	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsec)
Kepler 440	0,57 $M_{\odot}$	0,56 $R_{\odot}$	0,117 $L_{\odot}$	4134,0	261
Planeta		$e$	P (dias)		Semieixo maior (UA)
Kepler 440b	4,12 $M_T$	0,34	101,11	320,9	0,242

Produzido pelos autores. Os dados foram retirados dos catálogos de exoplanetas [Exoplante.eu] e [Kyoto University].

Ao se pensar em habitabilidade é interessante determinar a probabilidade de um planeta ser rochoso a partir de seu tamanho e medida das incertezas correspondente. Para isso [Torres *et al.* 2015] utiliza um modelo de densidade empírica que fornece uma estimativa da massa de um planeta em função do seu raio. Embora esse modelo tenda a apresentar planetas maiores e mais massivos já que são mais fáceis de encontrar. É possível contornar esse problema utilizando uma estimativa da taxa de ocorrência de planetas em função do seu tamanho [Fressin *et al.* 2013].

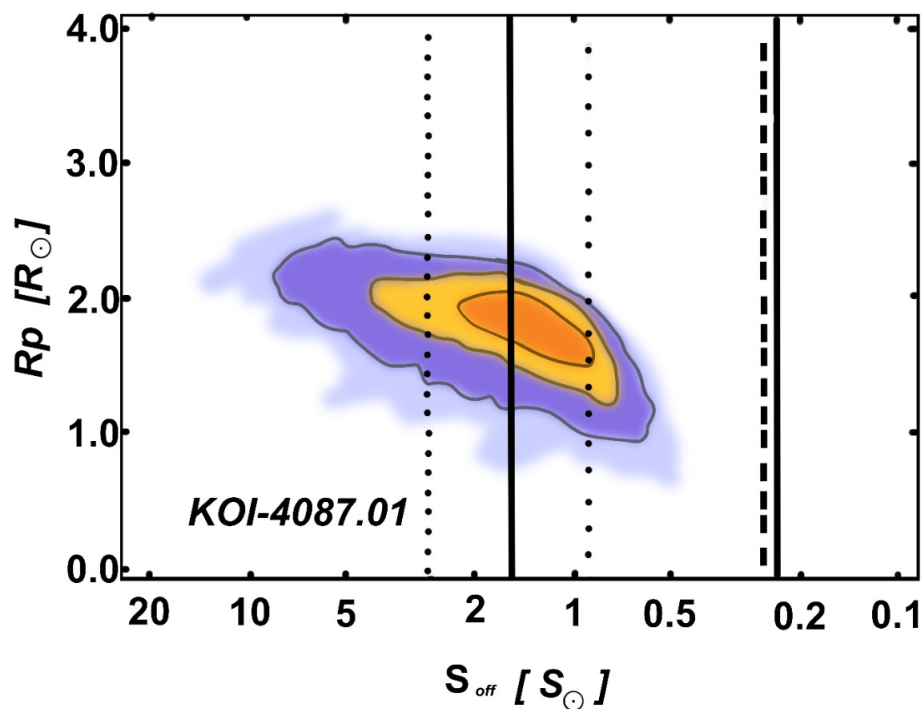
A partir da densidade podemos inferir a distribuição dos planetas em um diagrama massa-raio, que por sua vez, é utilizado para estabelecer a fração de planetas rochosos ou gasosos para uma massa ou raio determinado. Nesse trabalho vamos utilizar os dados obtidos por [Torres *et al.* 2015]. Dessa forma, consideramos rochoso qualquer planeta que tenha densidade maior do que uma composição de 100% de Perovskita de  $MgSiO_3$ <sup>17</sup>

<sup>17</sup> A Perovskita (óxido de cálcio e titânio,  $CaTiO_3$ ), é um mineral relativamente raro ocorrendo na forma de cristais ortorrômbicos. Sob condições de alta pressão do manto da Terra o  $MgSiO_3$  é um polimorfo da perovskita e pode ser um dos minerais mais comuns na Terra.

Kepler 440b é um exoplaneta com chance não desprezível de ser rochoso. Além dos modelos propostos por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] e [Kopparapu *et al.* 2013] apresentamos também uma combinação do modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013] e [Zsom *et al.* 2013]. Onde as bordas internas e externas da Zona Habitável otimista se estendem do ponto conhecido como “deserto seco” até “jovem Marte”.

É possível observar a distribuição do raio planetário e da insolação efetiva para Kepler 440. As linhas verticais marcam os vários limites da zona habitável definida por [Kopparapu *et al.* 2013] e [Zsom *et al.* 2013]. Aqui adotamos as bordas interna e externa otimistas de "deserto seco" e "jovem Marte", respectivamente

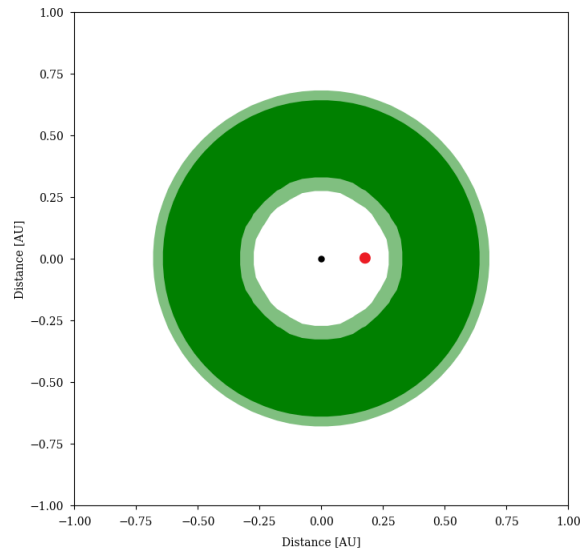
Figura 24 – Zona habitável conforme definido por [Kopparapu *et al.* 2013] e [Zsom *et al.* 2013]. As linhas retas correspondem aos limites "Jovem Vênus" e "Marte Recente", as linhas pontilhadas correspondem aos limites de "Perda de água" e "1ª condensação de  $CO_2$ ". A linha tracejada corresponde ao limite "Deserto seco".



[Torres *et al.* 2015].

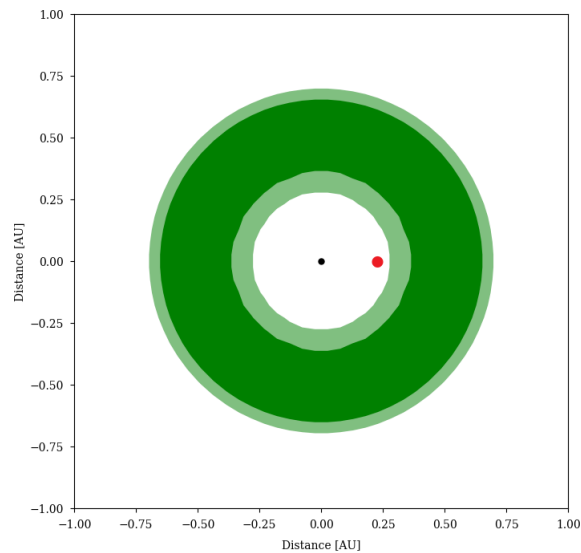
Na imagens abaixo estão as Zonas Habitáveis do sistema planetário Kepler 440.

Figura 25 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 440 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler 440b.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

Figura 26 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 440 pelo modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler440b.

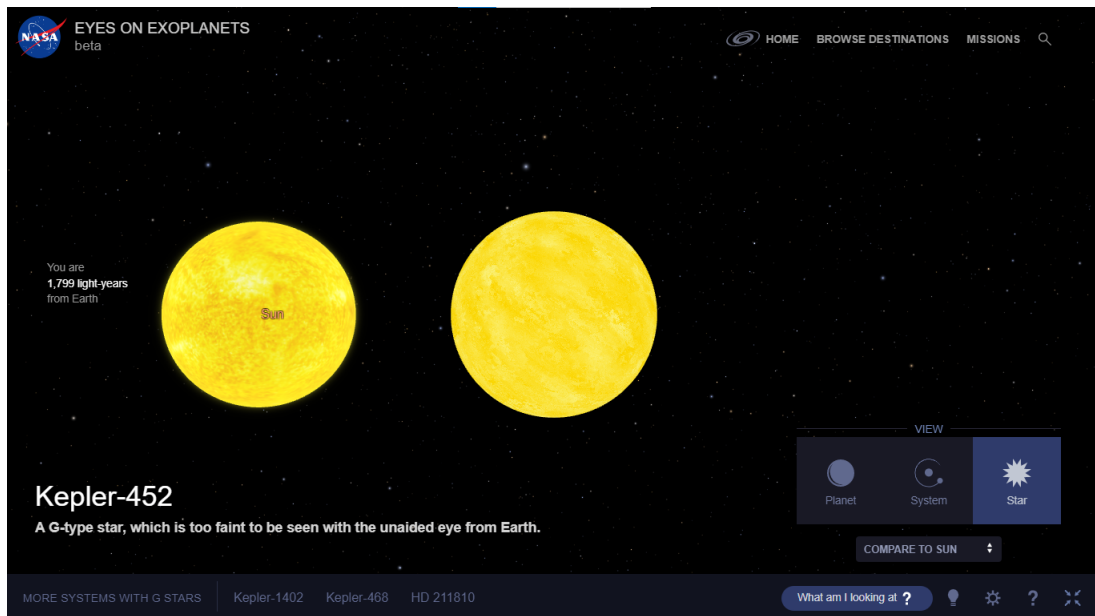


[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

## 4.8 KEPLER 452B

As estrelas de sequência principal, também conhecidas como estrelas anãs, constituem a maior parte das estrelas do universo. Uma dessas estrelas é o nosso Sol pertencente a classe espectral G2V, uma anã amarela, mesma classe da estrela Kepler 452, também conhecida como KIC 8311864, sendo essa em média um pouco maior e mais fria que o Sol. Não foi possível determinar o período de rotação da estrela, mas se estima que sua idade seja de  $6,0 (\pm 2, 0)$  Gyr [Jenkins *et al.* 2015].

Figura 27 – Representação da estrela Kepler 452 ao lado do Sol.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

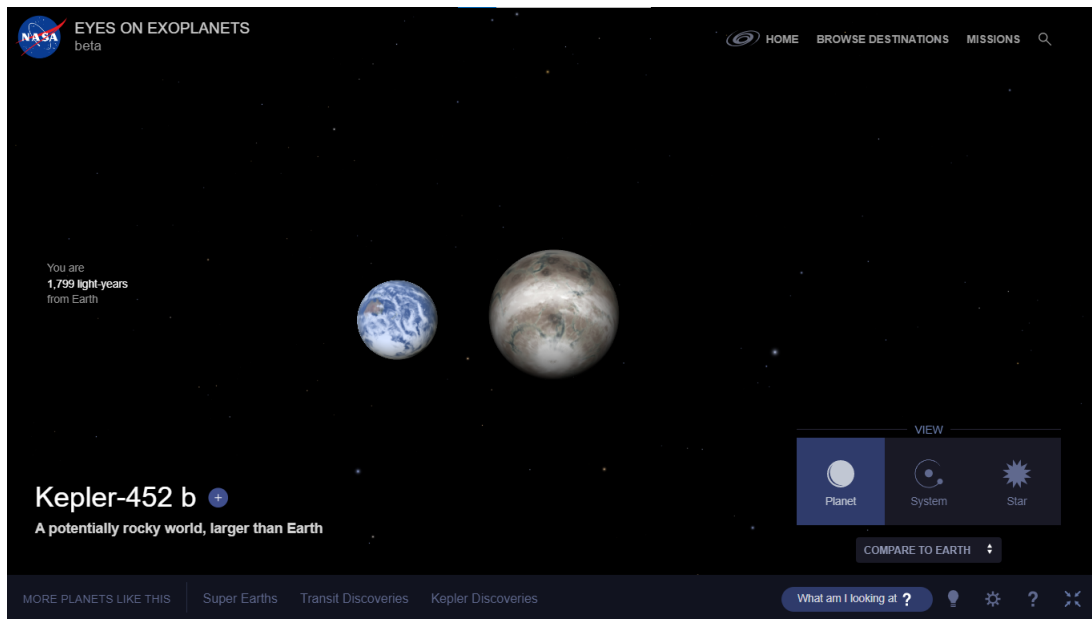
Tabela 6 – Dados dos planetas orbitando a estrela Kepler 452.

Estrela	M	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsec)
Kepler 452	$1,04 M_{\odot}$	$1,11 R_{\odot}$	$1,05 L_{\odot}$	5757,0	560,62
Planeta		$e$	P (dias)		Semieixo maior (UA)
Kepler 452b	$3,29 M_T$	0,035	348,84	265	1,046

Produzida pelos autores. Os dados foram retirados dos catálogos de exoplanetas [Exoplante.eu] e [Kyoto University].

Como a massa do planeta Kepler 452b não é medida, não é possível determinar se o planeta é rochoso, mas de acordo com estatísticas da relação massa-raio derivada de amostras observacionais com um raio menor que  $4R$  a probabilidade de que Kepler 452b seja um planeta rochoso com uma atmosfera fina está entre 49% e 62% de acordo com [Jenkins *et al.* 2015]. Também é possível que Kepler 452b seja um planeta com um pequeno núcleo rochoso e um envelope gasoso espesso. Conhecer a atmosfera de um planeta é muito importante ao se determinar a habitabilidade do mesmo, uma vez que a temperatura da superfície planetária não é determinada apenas pela distância entre ele

Figura 28 – Representação do exoplaneta Kepler 452b ao lado da Terra.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

e sua estrela hospedeira, mas também, pela concentração de gases do efeito estufa em sua atmosfera. Dessa forma, se a concentração de gases do efeito estufa for muito baixa o planeta pode experimentar um congelamento descontrolado através do feedback positivo do albedo devido ao aumento da cobertura de gelo. Já no caso de uma grande concentração de gases do efeito estufa a temperatura de superfície pode ser muito alta, fazendo com que o planeta seja inabitável.

Um meio de controlar a quantidade de  $CO_2$ , um dos principais gases do efeito estufa, presente na atmosfera terrestre é através do ciclo do carbono-silicato, um mecanismo de feedback negativo capaz de estabilizar o clima. Nesse ponto existem duas possibilidades para a composição das STs, como Kepler 452b, no primeiro caso são planetas parcialmente cobertos pelo oceano, semelhantes a Terra, e o ciclo do carbono silicato é capaz de manter as quantidades de  $CO_2$  na atmosfera. No segundo caso, essas STs, são provavelmente aquaplanetas com oceanos extensos.

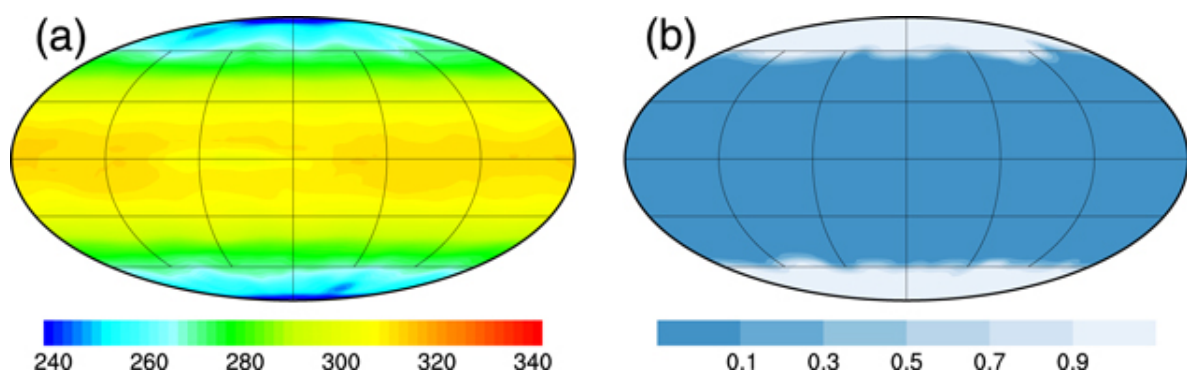
Como a habitabilidade de um planeta é modulada pela concentração de  $CO_2$ . Pressões parciais muito altas de  $CO_2$  ( $\rho CO_2$ ) resultam em temperaturas de superfície muito altas. Já valores intermediários de  $\rho CO_2$  são capazes de evitar que a superfície global seja coberta por gelo. O funcionamento do intemperismo do silicato em aquaplanetas é desconhecido. Especulações sugerem que atmosferas de aquaplanetas podem ter altos níveis de  $CO_2$ . Uma vez que o intemperismo do silicato é mais eficiente em faixas de terra expostas. Nesse caso, aquaplanetas em que os continentes estejam totalmente submersos podem não ser capazes de reciclar o  $CO_2$  atmosférico de forma eficiente. Outras especulações sugerem que as concentrações de  $CO_2$  podem ser limitadas pelo intemperismo do silicato

no fundo do oceano. Dessa forma, se o intemperismo do silicato no fundo do mar for eficiente, Kepler 452b pode experimentar um estado de “bola de neve”. No caso da ausência do intemperismo do silicato o aquaplaneta pode ser muito quente para ser considerado habitável.

[Hu *et al.* 2017] utiliza um modelo de circulação geral tridimensional atmosfera-oceano (AOGCM) para estudar o clima de exoplanetas. O modelo foi modificado com os parâmetros planetários de Kepler 452b, obtidos através das observações da missão Kepler ([Jenkins *et al.* 2015]). Como o parâmetro da gravidade é desconhecido porque não é possível determinar a massa do planeta, foi assumido que Kepler 452b é um planeta rochoso com densidade igual à da Terra e com profundidade oceânica uniforme de 4km. O modelo é iniciado com as composições atuais da atmosfera da Terra e é executado pela primeira vez por 1000 anos terrestres. Em seguida o modelo é executado novamente utilizando os resultados da simulação anterior como condições iniciais para três simulações diferentes. Cada uma dessas três simulações é executada por 500 anos para atingir o equilíbrio. As três simulações apresentam diferentes níveis de  $CO_2$  na atmosfera. Sendo eles: concentração de  $CO_2$  presente na Terra ( $E - CO_2$ ), baixa concentração de  $CO_2$  ( $L - CO_2$ ) e alta concentração de  $CO_2$  ( $H - CO_2$ ).

O lado esquerdo das imagens, representado pela letra (a), mostra a distribuição global das temperaturas médias mensais do ar na superfície (SATs). Enquanto o lado esquerdo, representado pela letra (b), mostra a distribuição global das frações médias mensais de gelo marinho.

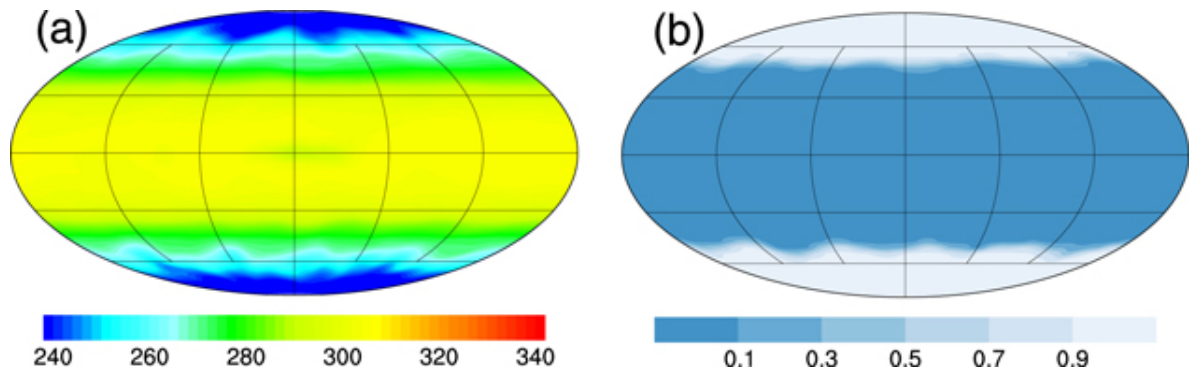
Figura 29 – Distribuição global de SATs e fração de gelo marinho na simulação de  $E - CO_2$ .  
(a) SATs em k, (b) fração de gelo marinho em %.



[Hu *et al.* 2017].

Para  $E - CO_2$  o SAT mais alto é de aproximadamente 310 k nos trópicos. Enquanto o menor SAT é de 240 k em ambas as regiões polares. A cobertura de gelo marinho se estende dos polos até cerca de  $55^\circ$  em ambos os hemisférios. O SAT médio global de Kepler 452b é de 293k, cerca de 5 K maior do que o da Terra atualmente. Isso se deve ao fato de Kepler 452b receber cerca de 10% mais radiação do que a Terra, fazendo com que o exoplaneta seja mais quente para composições atmosféricas semelhantes.

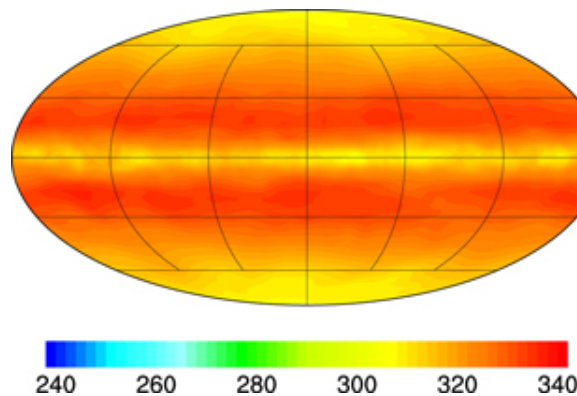
Figura 30 – Distribuição global de SATs e fração de gelo marinho na simulação de  $L - CO_2$ . (a) SATs em k, (b) fração de gelo marinho em %.



[Hu *et al.* 2017].

Para  $L - CO_2$  o SAT mais alto é de aproximadamente 310 k nos trópicos enquanto o menor SAT é de 240 k em ambas as regiões polares. A cobertura de gelo marinho se estende dos polos até cerca de apenas  $45^0$  em ambos os hemisférios. Como as bordas do gelo marinho estão longe da latitude crítica de congelamento descontrolado, proposta em simulações do estado de “bola de neve” da Terra por [Yang, Peltier e Hu 2012] e [Yang, Hu e Peltier 2012]. É insinuado que o congelamento descontrolado não pode acontecer, mesmo para concentrações de  $CO_2$  extremamente baixas.

Figura 31 – Distribuição global de SATs na simulação de  $H - CO_2$ . (a) SATs em k.



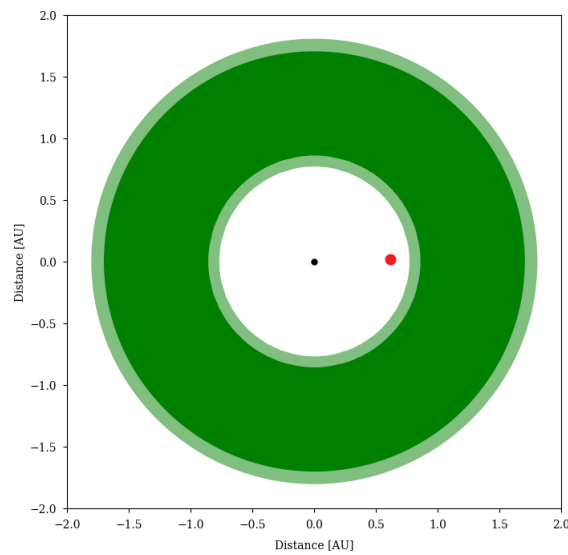
[Hu *et al.* 2017]

Para  $H - CO_2$  é interessante notar que os SATs mais altos não estão localizados sobre o equador, mas a cerca de  $15^0$  ao norte e ao sul do equador. Isso ocorre devido aos ventos do leste sobre os trópicos gerarem a ressurgência de água fria perto do equador e a força de Coriolis impulsionar a água quente da superfície em direção aos polos. Como o SAT mais baixo em ambas as regiões polares é de aproximadamente 300k, valor bem acima do ponto de congelamento da água, o planeta fica globalmente livre de gelo.

Os resultados obtidos por meio da simulação demonstram que Kepler 452b é um exoplaneta habitável se as concentrações de  $CO_2$  forem iguais ou menores que as da atmosfera terrestre. E que, mesmo para um SAT global de 322 K, Kepler 452b ainda é capaz

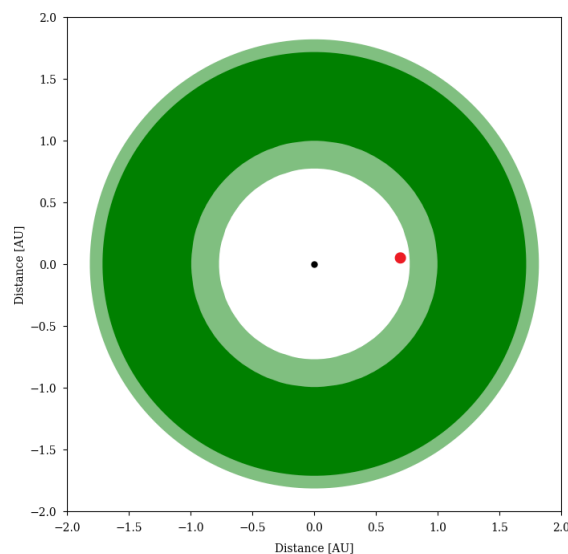
de reter seu estoque de água, desde que inicialmente tivesse oceanos com profundidade semelhantes ao da Terra. No caso da inexistência do intemperismo do carbono silicato para controlar a concentração de  $CO_2$  presente na atmosfera, o exoplaneta pode se tornar muito quente para ser considerado habitável. Caso Kepler 452b seja um aquaplaneta a habitabilidade do mesmo depende da eficiência do intemperismo no fundo do mar.

Figura 32 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 452 pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler 452b.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

Figura 33 – Zona Habitável do sistema planetário Kepler 452 pelo modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Kepler 452b.

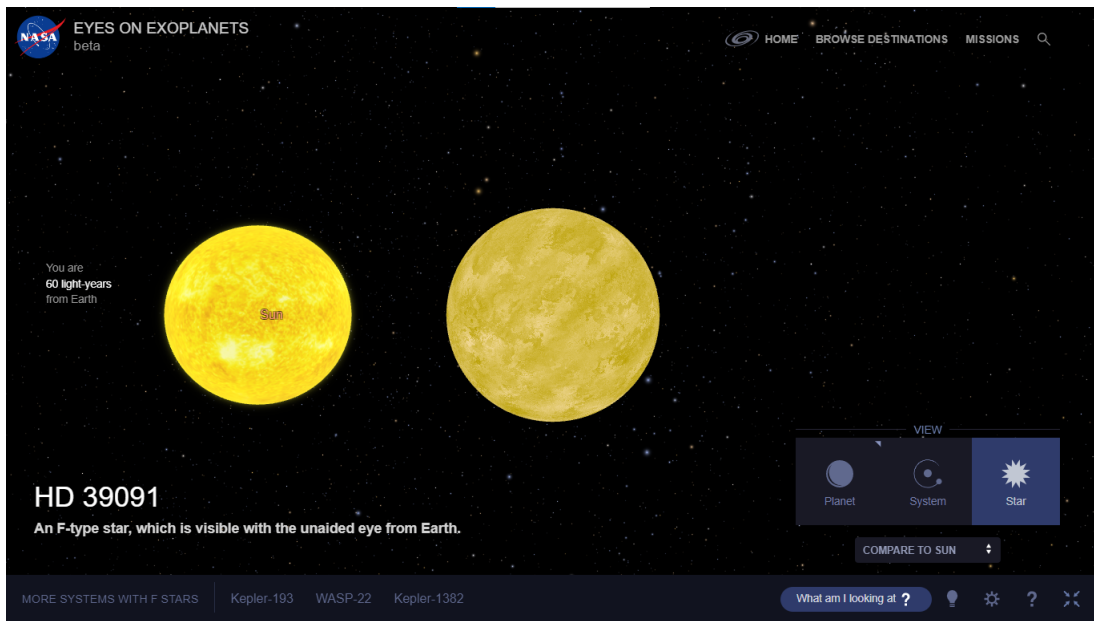


Müller Haghighipour (2014) através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)].

## 4.9 PI MENSAE C

A estrela Pi mensae, também conhecida como HD 39091, é uma estela de classe espectral  $G0V$ . Não foi possível identificar a luminosidade da estrela na bibliografia utilizada, dessa forma, para o cálculo da HZ utilizaremos o mesmo valor de luminosidade fornecido para Kepler 452, nesse caso, luminosidade de  $1,05 L_{\odot}$ . De acordo com os dados fornecidos por [Damasso *et al.* 2020] a estrela tem rotação de  $17,7 (\pm 0,5)$  dias, com idade de aproximadamente  $2,98 (\pm 1,4)$  Gyr de acordo com [Huang *et al.* 2018].

Figura 34 – Representação da estrela Pi Mensae ao lado do Sol.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Na tabela abaixo estão dados como massa, raio e excentricidade dos planetas que orbitam a estrela Pi mensae, assim como da própria estrela. Os dados foram obtidos por meio do catálogo de exoplanetas (exoplanet.eu) e pelo catálogo de exoplanetas fornecido pela universidade de Kyoto (exoplanetkyoto).

Tabela 7 – Dados dos planetas orbitando a estrela Pi Mensae

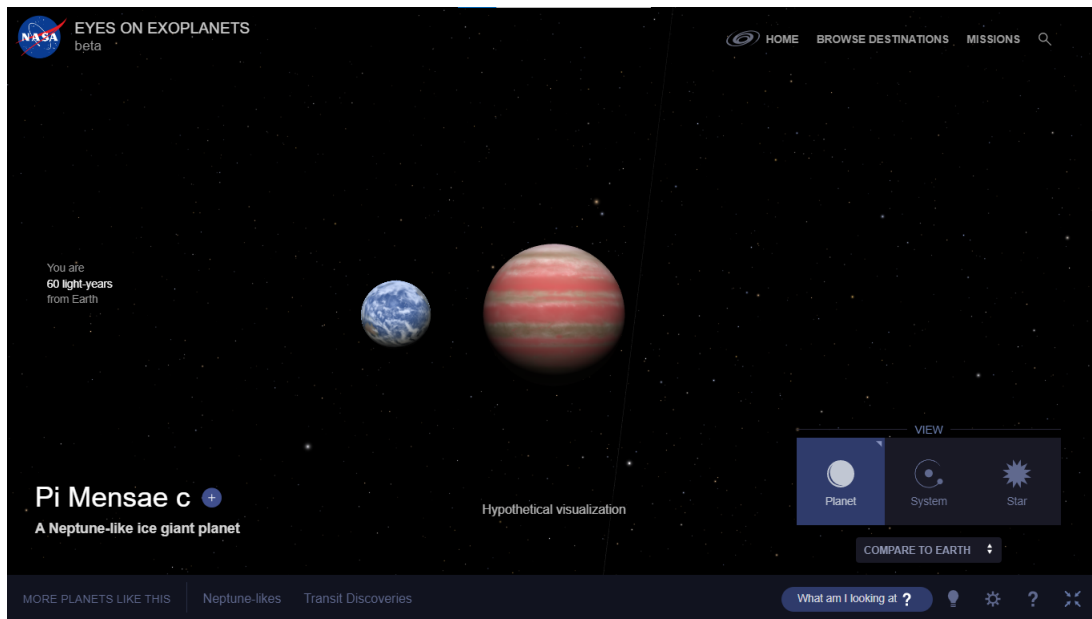
Estrela	M	Raio	Luminosidade	T (K)	Distância (parsec)
Pi Mensae	$1,1 M_{\odot}$	$1,1 R_{\odot}$	$1,05 L_{\odot}$	6037,0	18,32
Planeta		$e$	P (dias)		Semieixo maior (UA)
Pi Men b	$12,6 M_j$	0,645	2088,33	-	3,308
Pi Men c	$3,63 M_T$	0,15	6,27	1147.0	0.067
Pi Men d	-	0,22	124,64	-	-

Produzida pelos autores. Os dados foram retirados dos catálogos de exoplanetas [Exoplante.eu] e [Kyoto University].

De acordo com [Damasso *et al.* 2020] um dos motivos que torna Pi mensae interessante é que ele hospeda uma companheira subestelar,<sup>18</sup> Pi men b, detectada por

<sup>18</sup> Objetos astronômicos cuja massa é menor que  $0,08M_{\odot}$

Figura 35 – Representação do exoplaneta Pi Mensae c ao lado da Terra.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

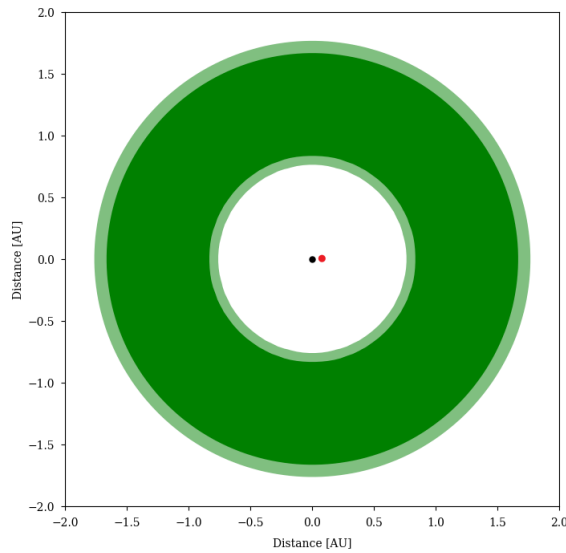
doppler. Como não é possível fazer uma distinção clara se Pi mensae b se trata realmente de um objeto subestelar ou de um gigante gasoso vamos calcular a zona habitável de Pi men para ambos os casos.

De acordo com [Muñoz *et al.* 2021] planetas com relação de raio  $R_p/R_T < 1,6$  são provavelmente rochosos. Enquanto que planetas com  $R_p/R_T > 3$  devem apresentar uma quantidade não desprezível de componentes leves. A partir da densidade aparente de Pi Men c é consistente dizer que o planeta possui uma atmosfera que contém uma mistura de materiais leves e pesados. o que faz com que o planeta não seja dominado por  $H_2/H_e$ . Esse tipo de atmosfera é sugerida como resultado da evaporação de materiais voláteis ao redor de um núcleo rochoso.

Nas figuras abaixo mostramos a região ao redor da estrela Pi Mensae na qual a Zona Habitável reside. Como dito anteriormente, não é possível determinar se Pi Men b se trata realmente de um gigante gasoso supermassivo ou de uma anã marrom, estrelas pequenas demais para iniciar a fusão do hidrogênio em seu núcleo e com baixa luminosidade. Dessa forma vamos primeiro determinar a HZ no caso de Pi Men b ser um planeta. Nesse caso sua massa e luminosidade não interferem na HZ de Pi Mensae. No segundo caso, considerando Pi Mensae b uma estrela de baixa luminosidade, passamos a ter um sistema binário. Com duas estrelas orbitando ao redor do centro de massa do sistema, dessa forma, as estrelas devem estar distantes o suficiente para que cada uma apresente uma HZ diferente, ou próximas o suficiente para que exista apenas uma HZ. Para o cálculo o calculo do sistema binário usaremos  $0,01 L_{\odot}$  como o valor de luminosidade e  $0,0115 M_{\odot}$  como o valor da massa de Pi Mensae c. Como valor de temperatura utilizaremos 2800k.

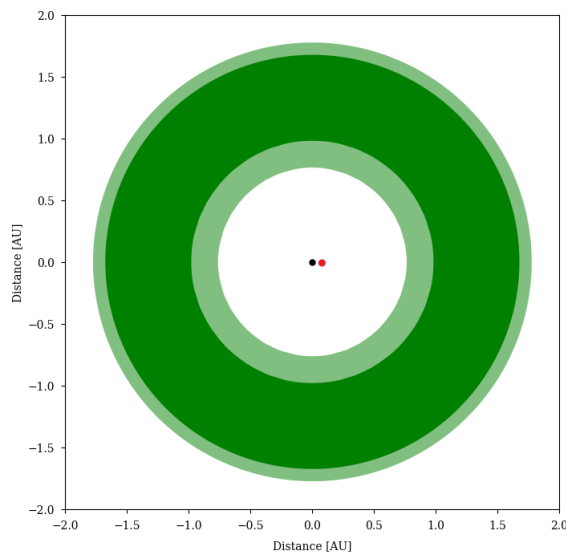
É importante informar a excentricidade e o valor do semieixo maior entre as estrelas. Nesse caso utilizamos os valores de excentricidade e semieixo maior fornecidos no catálogo de exoplanetas (exoplanet.eu) para Pi Mensae b.

Figura 36 – Zona Habitável do sistema planetário Pi Mensae pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c.



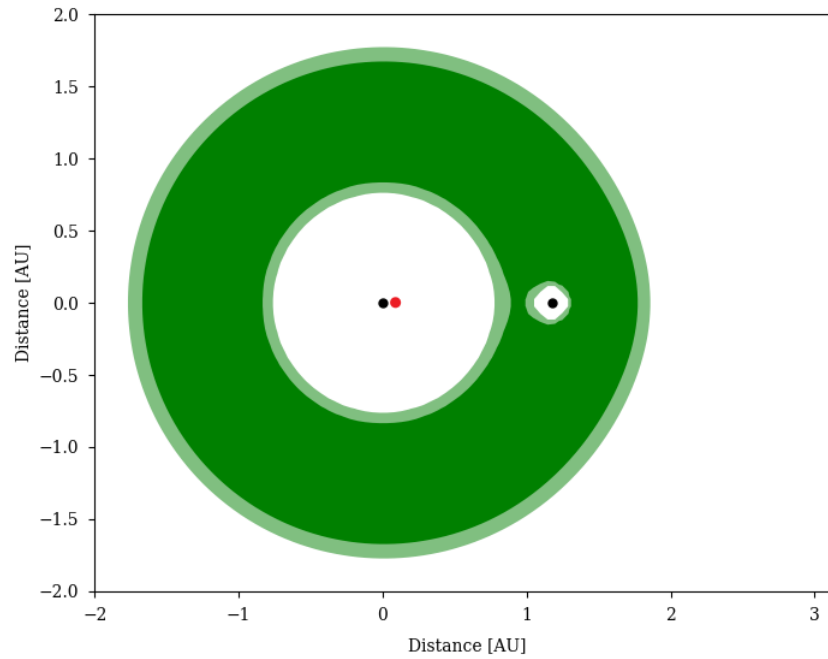
[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)]

Figura 37 – Zona Habitável do sistema planetário Pi mensae pelo modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c.



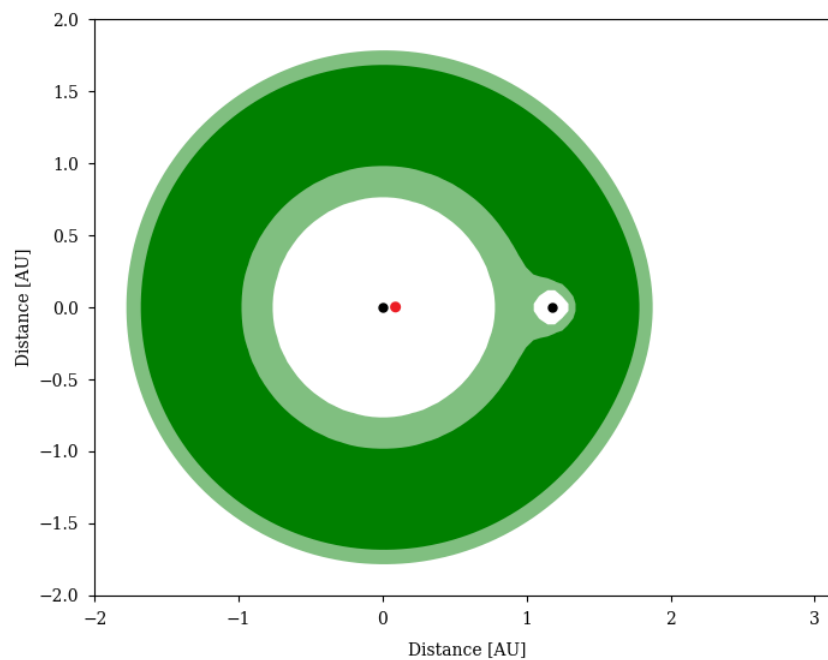
[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)]

Figura 38 – Zona Habitável do sistema planetário Pi Mensae pelo modelo proposto por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)]

Figura 39 – Zona Habitável do sistema planetário Pi mensae pelo modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013]. O ponto vermelho é uma aproximação da localização do exoplaneta Pi Men c.



[Müller e Haghighipour 2014] através do site [[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/)]

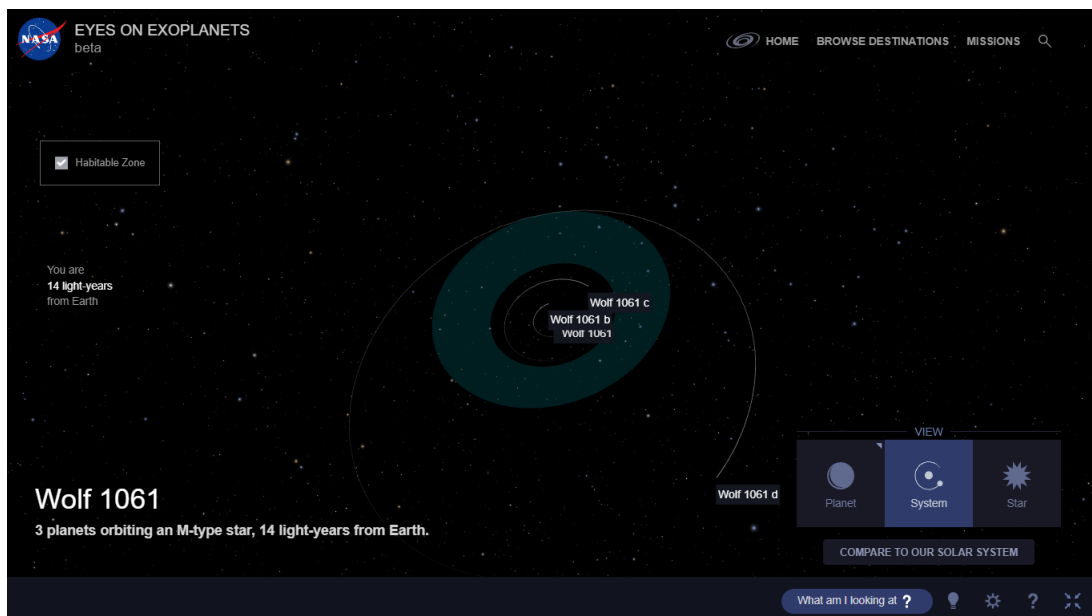
No modelo proposto por [Kopparapu *et al.* 2013] o limite interno otimista da Zona Habitável são extensos o suficiente para que englobem a estrela menor. Fazendo com que haja apenas uma Zona Habitável otimista para as estrelas. Já para [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] o limite interno é dado pelo limite de perda de água e por isso é bem menor. Fazendo com que cada estrela tenha sua própria Zona Habitável otimista.

## 5 CONCLUSÃO

Ao se determinar a habitabilidade de exoplanetas, existem alguns fatores que devem ser considerados. Entre eles estão as forças de maré, sua temperatura, atmosfera, os ciclos orbitais e a existência de água em estado líquido na superfície do exoplaneta.

Com a ajuda das informações obtidas através da literatura sobre o assunto e dos catálogos de exoplanetas disponíveis foi possível determinar a temperatura, e em alguns casos uma suposição de como seria a atmosfera ou composição, dos exoplanetas Wolf 1061c, GJ 682b, Kepler 440b, Kepler 452b e Pi Mensae c. Também foi possível determinar alguns parâmetros que poderiam afetar a habitabilidade desses planetas. Por último utilizando o programa computacional proposto por [Müller e Haghighipour 2014] foi possível determinar as Zonas Habitáveis propostas por [Kasting, Whitmire e Reynolds 1993] e por [Kopparapu *et al.* 2013] através do site [//astro.twam.info/hz/]. A diferença entre esses modelos está nos limites internos e externos das bordas da HZ. Pois enquanto Kopparapu admite uma visão otimista considerando os limites de “Jovem Vênus” e “Marte Recente”, Kasting tem uma visão mais conservadora e prefere utilizar os limites de “Perda de água” e “primeira condensação do  $CO_2$ ”. Na imagem abaixo está representado um modelo do sistema planetário de Wolf 1061 fornecido pelo [NASA’s Exoplanet Exploration Program].

Figura 40 – Representação do sistema planetário da estrela Wolf 1061.

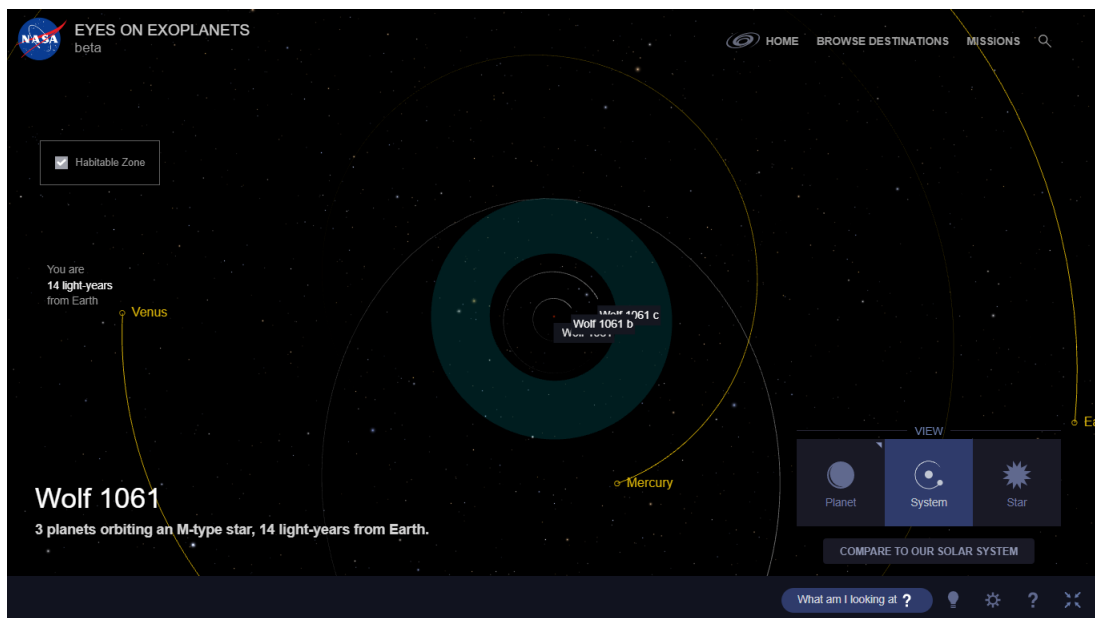


[NASA’s Exoplanet Exploration Program].

O exoplaneta Wolf 1061c se trata de uma Super Terra Quente com rotação síncrona causada pelas forças de maré. Se trata de um planeta pequeno e por isso

potencialmente rochoso. Devido as variações apresentadas em sua excentricidade, com valores que podem variar de 0,11 até 0,03, fazendo com que sua orbita seja quase circular, e da distância entre o exoplaneta e a estrela, semieixo maior de  $0,089UA$ . A orbita de Wolf 1061c se encontra inteiramente interna a Zona Habitável proposta para estrelas do tipo M. A proximidade com a estrela aliada a rotação síncrona faz com que seja um planeta quente. Provavelmente com uma atmosfera espessa semelhante à de Vênus, com um efeito estufa descontrolado. Fazendo com que seja improvável a existência de água em estado líquido na superfície do planeta. E conseqüentemente com que seja improvável a existência de vida no exoplaneta.

Figura 41 – Representação do sistema planetário da estrela Wolf 1061 em comparação com o sistema solar.



[NASA's Exoplanet Exploration Program]

O planeta GJ 682b, assim como Wolf 1061c, é um exoplaneta potencialmente rochoso bloqueado por maré. Fazendo com que a temperatura de superfície seja maior em um lado e menor no outro. Mas, ao contrário de Wolf 1061c, o exoplaneta não apresenta uma temperatura tão elevada. Uma resposta para isso está na força do efeito Coriolis presente na atmosfera do exoplaneta. A partir da intensidade do efeito Coriolis podemos determinar a inércia térmica superficial e atmosférica. Uma possibilidade para a temperatura de superfície relativamente baixa de GJ 682b, em comparação com outras STQ, é que o exoplaneta apresenta uma pequena inércia térmica. Fazendo com que os dias sejam longos, causando uma grande diferença de temperatura entre o lado iluminado e o lado escuro. Essa diferença é responsável por causar uma ascensão da temperatura no lado iluminado. Essa ascensão de temperatura em planetas bloqueados por maré e orbitando estrelas do tipo M resulta em uma cobertura de nuvens espessas. A quantidade de nuvens na atmosfera do exoplaneta é muito importante ao se determinar o valor do albedo planetário. Quanto

maior for a quantidade de nuvens na atmosfera, maior será o índice de refletividade e menor será a temperatura de superfície.

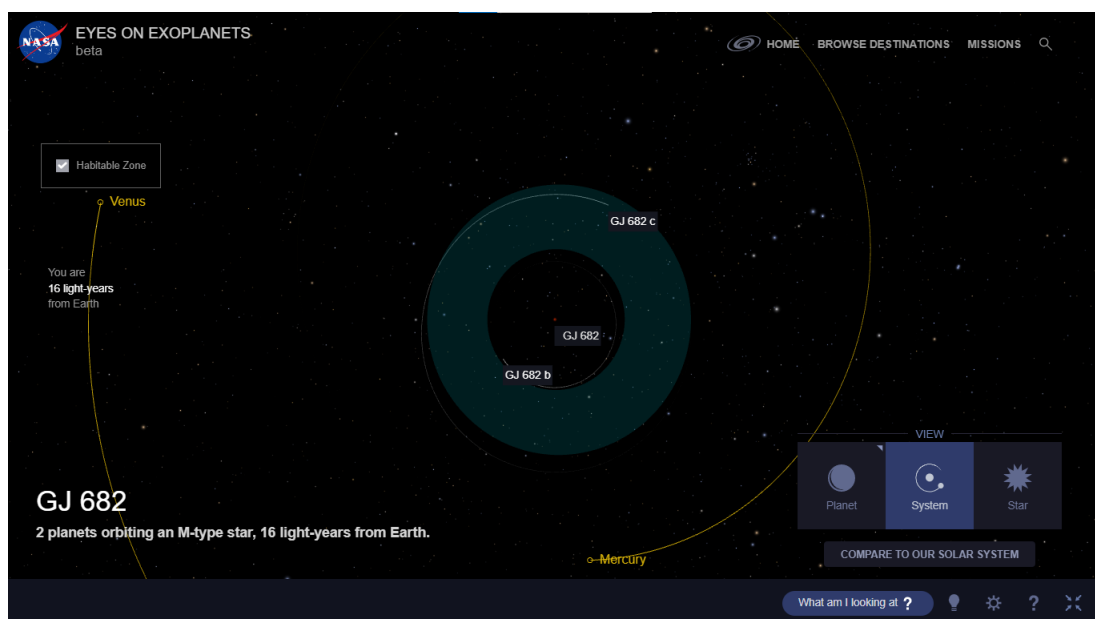
Figura 42 – Representação do sistema planetário da estrela GJ 682.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Apesar de não apresentar uma temperatura de superfície excessiva. A órbita do planeta estar contida internamente a Zona Habitável. Fazendo com que seja pouco provável a existência de água em estado líquido na superfície do planeta.

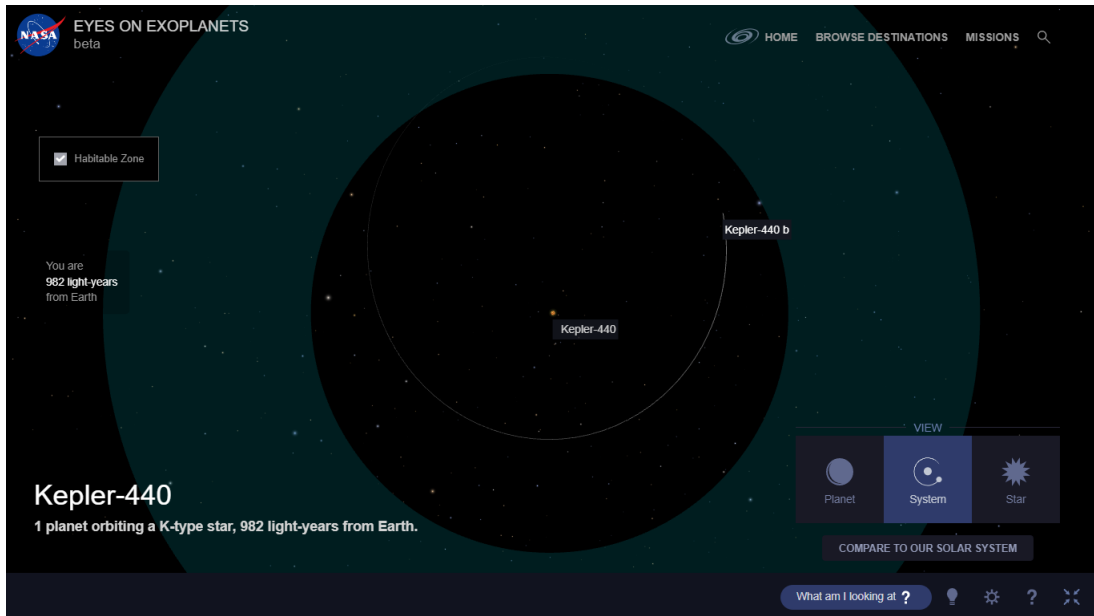
Figura 43 – Representação do sistema planetário da estrela GJ 682 em comparação com o sistema solar.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Kepler 440b é um exoplaneta com chances não desprezíveis de ser rochoso de acordo com o modelo proposto por [Torres *et al.* 2015]. Exoplanetas com  $e > 0,2$  passam por grandes variações de temperatura em orbitas compactas. Criando a possibilidade do planeta passar por períodos de calor e frio extremos.

Figura 44 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 440.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Figura 45 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 440 em comparação com o sistema solar.



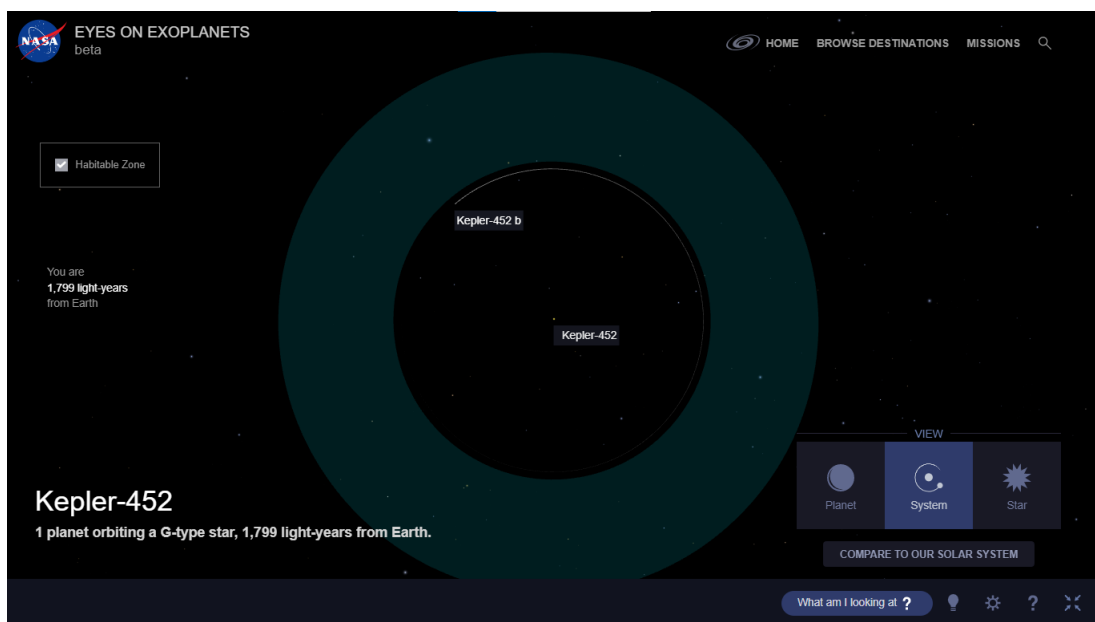
[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Com excentricidade igual a 0,34 o exoplaneta Kepler 440b deve passar por períodos extremamente quentes no periastro e intensamente frios no apoastro. Por causa

de sua órbita altamente excêntrica Kepler 440b passa por períodos fora da Zona Habitável proposta para estrelas do tipo K. O que não exclui a possibilidade de água líquida em sua superfície, mas torna improvável a existência de vida como se conhece na Terra.

De acordo com [Jenkins *et al.* 2015] a probabilidade de Kepler 452b ser um planeta rochoso é de 49% a 62%. Outra possibilidade é a de que Kepler 452b seja um planeta com um núcleo rochoso envolto por um envelope volátil. Essa condição é condizente com um aquaplaneta que contém grandes concentrações de  $CO_2$  em sua atmosfera. Dessa forma, se Kepler 452b for um aquaplaneta a manutenção da temperatura em sua superfície vai depender da eficiência do ciclo do carbono silicato no fundo do oceano.

Figura 46 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 452.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Devido a distância entre a estrela e o exoplaneta a temperatura superficial de Kepler 452b não é muito alta, o que torna possível a existência de um oceano de água líquida. A existência desse oceano também depende de que o intemperismo do carbono silicato seja eficiente o bastante para que o planeta não fique preso em um estado de “bola de neve”. Ou completamente ausente fazendo com que o aquaplaneta seja muito quente para ser considerado habitável.

Uma parte da órbita de Kepler 452b está contida fora da HZ otimista. Dessa forma é pouco provável que o exoplaneta seja habitável, embora exista a possibilidade de se encontrar água em estado líquido em sua superfície. Como não é possível determinar a composição de Kepler 452b os estudos sobre esse exoplaneta representam um caso de teste para planetas cujo número deve aumentar em um futuro próximo, mas cuja caracterização precisa aguardar mais tempo [Silva *et al.* 2017].

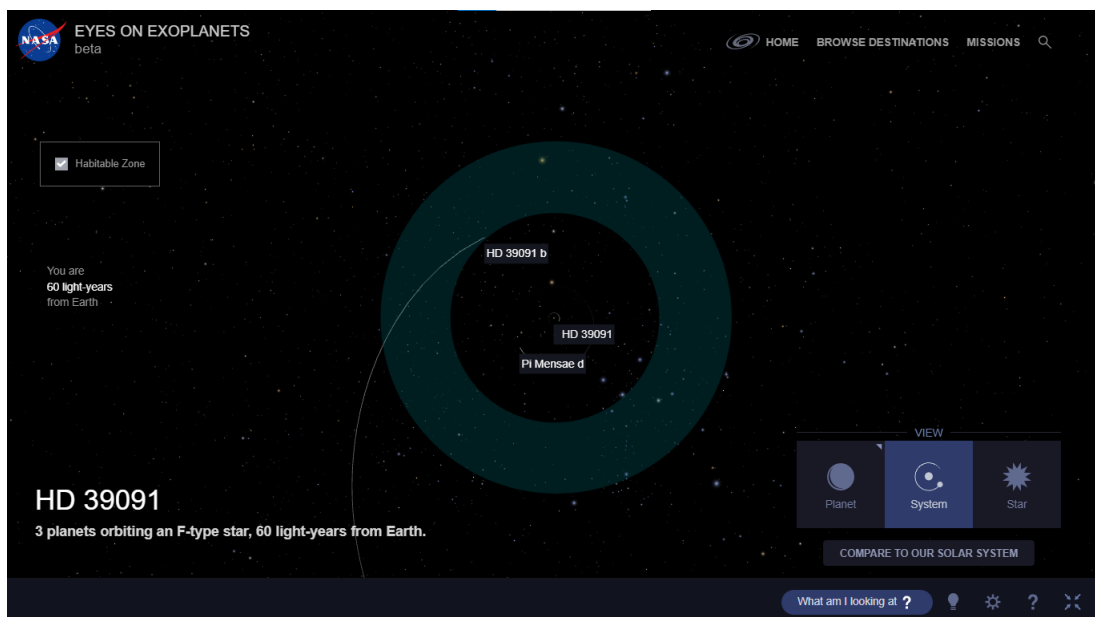
Figura 47 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 452 em comparação com o sistema solar.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Não é possível determinar se Pi Mensae c é um exoplaneta rochoso ou não. Embora, no caso de ser um planeta rochoso esteja provavelmente acoplado por maré a sua estrela. O foco de interesse nesse sistema se deve a existência de um gigante gasoso com  $12,6 M_j$  orbitando a estrela principal.

Figura 48 – Representação do sistema planetário da estrela Pi Mensae c.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Devido a proximidade com a estrela é improvável a existência de água na superfície do planeta. Mas o sistema é de interesse por conter uma provável anã marrom.

Fazendo com que seja um sistema binário com uma estrela principal, Pi Mensae, e uma secundária, Pi Mensae b.

Figura 49 – Representação do sistema planetário da estrela Kepler 440 em comparação com o sistema solar.



[NASA's Exoplanet Exploration Program].

Por se tratar de um sistema binário e pela proximidade das duas estrelas é possível dizer que o sistema conta com apenas uma Zona Habitável. Não é possível determinar se Pi Mensae c realmente se trata de um planeta rochoso. Uma possibilidade é de que seja um exoplaneta gasoso que se formou fora da órbita da estrela secundária e que tenha sido arrastado até sua posição atual por meio da migração de maré. Independentemente de qual caso se confirme verdadeiro, é improvável que Pi Mensae c seja um exoplaneta habitável.

É importante considerar que várias descobertas ainda podem ser feitas sobre a vida na Terra. Assim como sobre a composição dos exoplanetas. Fazendo com que no futuro seja possível determinar com precisão os exoplanetas habitáveis. Para isso é fundamental que mais pesquisas sejam feitas, pois ainda entendemos muito pouco sobre o assunto.

## REFERÊNCIAS

[//astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/). *Habitable Zones in Multiple Star Systems*. Disponível em: [:http://astro.twam.info/hz/](http://astro.twam.info/hz/).

ASGHARI, N.; BROEG, C.; CARONE, L.; CASAS-MIRANDA, R.; PALACIO, J. C.; CSILLIK, I.; DVORAK, R.; FREISTETTER, F.; HADJIVANTSIDES, G.; HUSSMANN, H. *et al.* Stability of terrestrial planets in the habitable zone of gl 777 a, hd 72659, gl 614, 47 uma and hd 4208. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 426, n. 1, p. 353–365, 2004.

ASTUDILLO-DEFRU, N.; FORVEILLE, T.; BONFILS, X.; SÉGRANSAN, D.; BOUCHY, F.; DELFOSSE, X.; LOVIS, C.; MAYOR, M.; MURGAS, F.; PEPE, F. *et al.* The harps search for southern extra-solar planets-xli. a dozen planets around the m dwarfs gj 3138, gj 3323, gj 273, gj 628, and gj 3293. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 602, p. A88, 2017.

BERGER, A. The milankovitch astronomical theory of paleoclimates: a modern review. *Vistas in Astronomy*, Elsevier, v. 24, p. 103–122, 1980.

BOER, P. L. D.; SMITH, D. G. Orbital forcing and cyclic sequences. *Orbital forcing and cyclic sequences*, Wiley Online Library, p. 1–14, 1994.

CHAMBERS, J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 304, n. 4, p. 793–799, 1999.

DAMASSO, M.; SOZZETTI, A.; LOVIS, C.; BARROS, S.; SOUSA, S.; DEMANGEON, O.; FARIA, J.; LILLO-BOX, J.; CRISTIANI, S.; PEPE, F. *et al.* A precise architecture characterization of the  $\pi$  mensae planetary system. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 642, p. A31, 2020.

DIAS, A. A. C.; ANDRADE-NETO, A.; MILTAO, M. A atmosfera terrestre: Composição e estrutura. 2007.

DOLE, S. Habitable planets for man, new york, blaisdell pub. *Co.[1964]*, 1964.

Exoplanete.eu. *Extrasolar Planet's Catalogue*. Disponível em: [:http://exoplanet.eu/catalog/](http://exoplanet.eu/catalog/).

FOGG, M. J. An estimate of the prevalence of biocompatible and habitable planets. 1992.

FORGET, F.; PIERREHUMBERT, R. T. Warming early mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 278, n. 5341, p. 1273–1276, 1997.

FRESSIN, F.; TORRES, G.; CHARBONNEAU, D.; BRYSON, S. T.; CHRISTIANSEN, J.; DRESSING, C. D.; JENKINS, J. M.; WALKOWICZ, L. M.; BATALHA, N. M. The false positive rate of kepler and the occurrence of planets. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 766, n. 2, p. 81, 2013.

GILLILAND, R. L. Solar evolution. *Global and planetary change*, Elsevier, v. 1, n. 1-2, p. 35–55, 1989.

- GOUGH, D. Solar interior structure and luminosity variations. In: *Physics of solar variations*. [S.l.]: Springer, 1981. p. 21–34.
- HART, M. H. The evolution of the atmosphere of the earth. *Icarus*, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 23–39, 1978.
- HU, Y.; WANG, Y.; LIU, Y.; YANG, J. Climate and habitability of kepler 452b simulated with a fully coupled atmosphere–ocean general circulation model. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 835, n. 1, p. L6, 2017.
- HUANG, C. X.; BURT, J.; VANDERBURG, A.; GÜNTHER, M. N.; SHPORER, A.; DITTMANN, J. A.; WINN, J. N.; WITTENMYER, R.; SHA, L.; KANE, S. R. *et al.* Tess discovery of a transiting super-earth in the pi mensae system. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 868, n. 2, p. L39, 2018.
- HUANG, S.-S. Occurrence of life in the universe. *American scientist*, JSTOR, v. 47, n. 3, p. 397–402, 1959.
- JENKINS, J. M.; TWICKEN, J. D.; BATALHA, N. M.; CALDWELL, D. A.; COCHRAN, W. D.; ENDL, M.; LATHAM, D. W.; ESQUERDO, G. A.; SEADER, S.; BIERYLA, A. *et al.* Discovery and validation of kepler-452b: a 1.6 r super earth exoplanet in the habitable zone of a g2 star. *The Astronomical Journal*, IOP Publishing, v. 150, n. 2, p. 56, 2015.
- JR, I. I. Stellar evolution within and off the main sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 5, p. 571, 1967.
- KALTENEGGER, L.; KASTING, J. Session 22. habitability of super-earths. *Astrobiology*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 . . . , v. 8, n. 2, p. 394–396, 2008.
- KALTENEGGER, L.; SELSIS, F. Biomarkers set in context. *Extrasolar planets: Formation, detection and dynamics*, Wiley Online Library, p. 79–98, 2007.
- KANE, S. R.; BRAUN, K. V.; HENRY, G. W.; WATERS, M. A.; BOYAJIAN, T. S.; MANN, A. W. Characterization of the wolf 1061 planetary system. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 835, n. 2, p. 200, 2017.
- KASTING, J.; TOON, O. Climate evolution on the terrestrial planets. *Origin and evolution of planetary and satellite atmospheres*, p. 423–449, 1989.
- KASTING, J. F. Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of earth and venus. *Icarus*, Elsevier, v. 74, n. 3, p. 472–494, 1988.
- KASTING, J. F.; CATLING, D. *et al.* Evolution of a habitable planet. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 41, n. 1, p. 429–463, 2003.
- KASTING, J. F.; WHITMIRE, D. P.; REYNOLDS, R. T. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, Elsevier, v. 101, n. 1, p. 108–128, 1993.
- KOPPARAPU, R. K.; RAMIREZ, R.; KASTING, J. F.; EYMET, V.; ROBINSON, T. D.; MAHADEVAN, S.; TERRIEN, R. C.; DOMAGAL-GOLDMAN, S.; MEADOWS, V.; DESHPANDE, R. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 765, n. 2, p. 131, 2013.

KUKLA, G.; GAVIN, J. Insolation regime of the warm to cold transitions. In: *Start of a Glacial*. [S.l.]: Springer, 1992. p. 307–339.

Kyoto University. *Extrasolar Planet's Catalogue produced by Kyoto University*. Disponível em: <http://www.exoplanetkyoto.org/?lang=en>.

LANGER, N.; KUDRITZKI, R. The spectroscopic hertzsprung-russell diagram. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 564, p. A52, 2014.

LENCHUK, A. P.; FERREIRA, A. M.; VETTORACI, D. B.; BAYERL, L. C.; GOMES, R. da T. Como identificar exoplanetas. *Cadernos de Astronomia*, v. 2, n. 1, p. 191–191, 2021.

LOCKWOOD, J. Milankovitch theory and ice ages. *Progress in Physical Geography*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 4, n. 1, p. 79–87, 1980.

MACIEL, W. J. Futuro do sol. *Ciência Hoje das Crianças*, v. 8, n. 46, p. 10–2, 1995.

MILANKOVITCH, M. Canon of insolation and the iceage problem. *Koniglich Serbische Akademie Beograd Special Publication*, US Dept. of Commerce and National Science Foundation, v. 132, 1941.

MÜLLER, T. W.; HAGHIGHIPOUR, N. Calculating the habitable zones of multiple star systems with a new interactive web site. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 782, n. 1, p. 26, 2014.

MUÑOZ, A. G.; FOSSATI, L.; YOUNGBLOOD, A.; NETTELMANN, N.; GANDOLFI, D.; CABRERA, J.; RAUER, H. A heavy molecular weight atmosphere for the super-earth  $\pi$  men c. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 907, n. 2, p. L36, 2021.

NASA's Exoplanet Exploration Program. *Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. Disponível em: [://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7091/wolf-1061-c/](http://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7091/wolf-1061-c/).

NASA's Exoplanet Exploration Program. *Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. Disponível em: [:https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7495/gj-682-b/](https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7495/gj-682-b/).

NASA's Exoplanet Exploration Program. *Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. Disponível em: [:https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/5270/kepler-440-b/](https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/5270/kepler-440-b/).

NASA's Exoplanet Exploration Program. *Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. Disponível em: [:https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/5471/kepler-452-b/](https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/5471/kepler-452-b/).

NASA's Exoplanet Exploration Program. *Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. Disponível em: [:https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7271/pi-mensae-c/](https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/7271/pi-mensae-c/).

NEWMAN, M. J.; ROOD, R. T. Implications of solar evolution for the earth's early atmosphere. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 198, n. 4321, p. 1035–1037, 1977.

- NEWTON, E. R.; IRWIN, J.; CHARBONNEAU, D.; BERTA-THOMPSON, Z. K.; DITTMANN, J. A.; WEST, A. A. The rotation and galactic kinematics of mid m dwarfs in the solar neighborhood. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 821, n. 2, p. 93, 2016.
- OLIVEIRA, M. J. de; CARNEIRO, C. D. R.; VECCHIA, F. A. da S.; BAPTISTA, G. M. de M. Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima. *Terrae didática*, v. 13, n. 3, p. 149–184, 2017.
- PERLMUTTER, M. A.; FILHO, N. C. D. A. Cicloestratigrafia: teoria e tecnicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, p. 1, 2005.
- PERLMUTTER, M. A.; RADOVICH, B.; MATTHEWS, M. D. *The impact of high-frequency sedimentation cycles on stratigraphic interpretation*. [S.l.], 1997.
- RASOOL, S. I.; BERGH, C. de. The runaway greenhouse and the accumulation of co2 in the venus atmosphere. *Nature*, Springer, v. 226, n. 5250, p. 1037–1039, 1970.
- SANTOS, N. P.; BEZZEGHOUD, M.; CALDEIRA, B.; SANTOS, N. C.; SANTANA, M. Observações de planetas extrasolares no observatório astronômico da ribeira grande (fronteira). *Gazeta da Física*, v. 34, n. 3-4, p. 2–7, 2012.
- SCAFETTA, N. Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, v. 72, n. 13, p. 951–970, 2010.
- SHKLOVSKY, I. S.; SAGAN, C. Intelligent life in the universe. *New York: Delta*, 1966.
- SILVA, L.; VLADILO, G.; MURANTE, G.; PROVENZALE, A. Quantitative estimates of the surface habitability of kepler-452b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 470, n. 2, p. 2270–2282, 2017.
- SOLOMON, S. C.; HEAD, J. W.; KAULA, W. M.; MCKENZIE, D.; PARSONS, B.; PHILLIPS, R. J.; SCHUBERT, G.; TALWANI, M. Venus tectonics: Initial analysis from magellan. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 252, n. 5003, p. 297–312, 1991.
- SPIEGEL, D. S.; RAYMOND, S. N.; DRESSING, C. D.; SCHARF, C. A.; MITCHELL, J. L. Generalized milankovitch cycles and long-term climatic habitability. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 721, n. 2, p. 1308, 2010.
- TORRES, G.; KIPPING, D. M.; FRESSIN, F.; CALDWELL, D. A.; TWICKEN, J. D.; BALLARD, S.; BATALHA, N. M.; BRYSON, S. T.; CIARDI, D. R.; HENZE, C. E. *et al.* Validation of 12 small kepler transiting planets in the habitable zone. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 800, n. 2, p. 99, 2015.
- WALKER, J. C.; HAYS, P.; KASTING, J. F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 86, n. C10, p. 9776–9782, 1981.
- WHITMIRE, D.; REYNOLDS, R.; KASTING, J. Habitable zones for earth-like planets around main sequence stars. In: *Bioastronomy*. [S.l.]: Springer, 1991. p. 173–178.

- WRIGHT, D.; WITTENMYER, R.; TINNEY, C.; BENTLEY, J.; ZHAO, J. Three planets orbiting wolf 1061. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 817, n. 2, p. L20, 2016.
- YANG, J.; BOUÉ, G.; FABRYCKY, D. C.; ABBOT, D. S. Strong dependence of the inner edge of the habitable zone on planetary rotation rate. *The Astrophysical Journal Letters*, IOP Publishing, v. 787, n. 1, p. L2, 2014.
- YANG, J.; HU, Y.; PELTIER, W. Radiative effects of ozone on the climate of a snowball earth. *Climate of the Past*, Copernicus GmbH, v. 8, n. 6, p. 2019–2029, 2012.
- YANG, J.; PELTIER, W.; HU, Y. The initiation of modern soft and hard snowball earth climates in ccsm4. *Climate of the Past*, Copernicus GmbH, v. 8, n. 3, p. 907–918, 2012.
- ZSOM, A.; SEAGER, S.; WIT, J. D.; STAMENKOVIĆ, V. Toward the minimum inner edge distance of the habitable zone. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 778, n. 2, p. 109, 2013.