UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS - RIO CLARO

Ciências biológicas

Ana Paula Mendes Emygdio

Habitabilidade em exoplanetas do tipo terrestre

Rio Claro
2012

ANA PAULA MENDES EMYGDIO

HABITABILIDADE EM EXOPLANETAS DO TIPO TERRESTRE

Orientador: Nelson Callegari Junior

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Câmpus de Rio Claro, para obtenção do título de Bacharela e licenciada em Ciências Biológicas.

Rio Claro
2012

520 Emygdio, Ana Paula Mendes
E55h Habitabilidade em exoplanetas do tipo terrestre / Ana Paula Mendes Emygdio. - Rio Claro : [s.n.], 2012
70 f. : il., figs., gráfs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (licenciatura e bacharelado - Ciências biológicas) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro
Orientador: Nelson Callegari Junior

1. Astronomia. 2. Astrobiologia. 3. Super Terra. 4. Extremófilos. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

Dedico este trabalho a meus pais e a meu namorado pelo incentivo apoio e carinho, e também a toda ciência brasileira com o objetivo de incentivar e instigar a busca por vida extraterrestre.

AGRADECIMENTO

Primeiramente eu gostaria de agradecer meus pais por sempre me incentivarem a lutar pelos meus sonhos e desenvolver aquilo que me deixasse feliz. Em especial a meu pai por me instigar nos conhecimentos das ciências astronômicas e da ciência como um todo, e a minha mãe por sempre me dar suporte em minha vida independente e auxiliar na elaboração de redações.

Um enorme agradecimento ao Rafa por ser tão companheiro e paciente, me acalmando em tempos de estresse (turbulentos), me incentivando nos momentos de desânimo e constantemente corrigindo meus textos. Nunca poderei agradecer o suficiente.

Ao meu orientador agradeço, em primeiro lugar, por me aceitar como sua orientada sujeitando-se a desenvolver uma pesquisa de cunho tão interdisciplinar. Em segundo, por sempre ser tão atencioso, presente e preocupado em desenvolver uma pesquisa de qualidade.

Agradeço ainda ao grupo de astronomia M104 “Los Sombreros” por serem os responsáveis pela minha descoberta e meu imediato interesse pela área de astrobiologia. Entre eles agradeço em especial a João Fonseca, um grande incentivador, que repetidamente e didaticamente me explicou conceitos e teorias astronômicas. Ao meu colega de laboratório Bapt (Filipe Batista) por me auxiliar no desenvolvimento do trabalho, sempre se dispondo a ajudar.

Aos amigos, em especial Fino, Alci, Ju, Kaki, agradeço por me propiciarem momentos inesquecíveis e por serem parte das transformações que a universidade propiciou em minha vida.

Não existem palavras para demonstrar meu agradecimento a todos esses que me ajudaram não só no desenvolvimento do meu TCC como também do meu crescimento pessoal.

Por fim, ao CNPq agradeço pelo auxilio financeiro que permitiu que esse trabalho se realizasse, à UNESP e aos meus professores, que compartilharam seus conhecimentos e me proporcionaram um crescimento acadêmico imensurável.

Quando dizemos que a procura pela vida em outros locais é importante, não garantimos que será fácil encontrá-la, somente que é uma procura muito valiosa (Carl Sagan, 2009, p.41).

RESUMO

A astrobiologia, ciência que estuda a origem, evolução, distribuição e futuro da vida, tem como escopo a procura por vida em outros ambientes, como por exemplo, exoplanetas, planetas estes localizados fora do sistema solar. Através de observações e modelos teóricos que estimam alguns parâmetros gerais (composição, tipos de compostos presentes) pode-se criar um ambiente possível para o exoplaneta. O ambiente em que o planeta está inserido é um fator que pode ser determinante em relação a sua habitabilidade. A Zona Habitável é um dos parâmetros passíveis de delimitar os planetas que poderiam ser habitáveis. Muitos planetas identificados até agora têm características similares à da Terra. Entretanto, a maioria dos planetas, com possibilidade de ser do tipo terrestre, identificados até hoje são considerados Super Terras Quentes (STQ), pois estão fora da zona habitável uma vez que estão muito próximos de suas estrelas (período orbital da ordem de dias ou menos). Alguns desses estariam presentes na Zona habitável de suas respectivas estrelas, como é o caso de Gl 581 g, um planeta do sistema multi-planetário da estrela Gl 581. A proximidade da estrela sugere que eles apresentam uma rotação afetada por forças de maré. Deste modo, a taxa rotacional do planeta é sincronizada, sendo que uma de suas faces não recebe a energia da estrela, tornando-se gelada e a outra face recebe constantemente a energia da estrela, tornando-se muito quente. Embora em geral descarta-se a habitabilidade em STQ, estudos de resistência de vida em ambientes extremos não são muito explorados. As características analisadas partirão da premissa que o tipo de vida procurada será semelhante ao tipo de vida que encontramos na Terra, isto é, utilizando a água como solvente e apresentando uma química baseada no elemento carbono (Kaltenegger, L. et al., 2008). Assim, esse trabalho tem como objetivo a delimitação de quais os indicativos encontrados em um exoplaneta, que permite a determinação da sua habitabilidade (LAMMER et al., 2009) e a partir disso estimar a habitabilidade dos exoplanetas CoRoT-7 b, Kepler-9 d, Kepler-11 f, Gliese 876 d e Gliese 581 g.

Palavras-chaves: Astrobiologia. Exoplanetas. Habitabilidade. Extremófilos. Super Terra.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FIGURA RELACIONANDO A MASSA DA ESTRELA COM A SUA DISTÂNCIA À ESTRELA. 15
FIGURA 2 - RELAÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DE CO_2 E H_2O E DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE COM A DISTÂNCIA ORBITAL. 20
FIGURA 3 – DINÂMICA DO SISTEMA EXTRASOLAR GL 777A. 29
FIGURA 4 - ÁRVORE FILOGENÉTICA DO GENE 16S RRNA DE *ARCHAEA* COM OS GENOMAS REPRESENTADO OS 4 GRUPOS DE *ARCHAEA (EURYARCHAEOTA, CRENARCHAEOTA, KORARCHAEOTA E NANOARCHAEOTA*). 32
FIGURA 5 - MEMBRANA DE *ARCHAEA* E DE *BACTERIA* - A SETA INDICA O AUMENTO DA PERMEABILIDADE A ÍONS COMO PRÓTONS. A MEMBRANA DE *EUKARYA* É SIMILAR A DAS BACTÉRIAS. 33
FIGURA 6 – TEMPERATURA ÓTIMA DE CRESCIMENTO (OPTIMUN GROWTH TEMPERATURE) (ºC) E PH MÍNIMO SUPORTADO PARA QUE HAJA CRESCIMENTO (MINIMUM PH SUPPORTING GROWTH) REQUERIDOS PARA O CRESCIMENTO, DISTINGUINDO BACTÉRIAS TERMOFÍLICAS E *ARCHAEA*. 36
FIGURA 7 - ÁRVORE FILOGENÉTICA SEGUNDO WOESE *ET AL*., 1990, COM LOCALIZAÇÃO DE EXTREMÓFILOS. O TIPO DE EXTREMOFILIA ESTÁ IDENTIFICADO COM O CÓDIGO DE CORES INDICADO. 37
FIGURA 8 - PERFIL DE CRESCIMENTO (H^{-1})DO HIPERTERMÓFILO *PYROLOBUS FUMARII* EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (ºC). NOTA-SE QUE O ORGANISMO NÃO CRESCE ABAIXO DE 95 ºC. 40
FIGURA 9 - PERFIL DE ATIVIDADE (%) DE UMA ENZIMA INTRACELULAR DE *PYROCOCCUS HORIKOSHII* (SINTETASE DO MANOSILFOSFOGLICERATO) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (ºC). A ENZIMA APRESENTA ATIVIDADE MÁXIMA ENTRE 90ºC E 100ºC. 40
FIGURA 10 - RAIO DOS PLANETAS (R/R_E) COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES CALCULADAS EM FUNÇÃO DA SUA MASSA (M/M_E). 43
FIGURA 11 – COMPOSIÇÃO DE BSE RELACIONANDO O LOG EM FRAÇÃO DE MOLE COM A TEMPERATURA (K). 45
FIGURA 12 – COMPOSIÇÃO DE CROSTA CONTINENTAL RELACIONANDO O LOG EM FRAÇÃO DE MOLE COM A TEMPERATURA (K). 45
FIGURA 13 - GASES PRINCIPAIS H, C, S, N RELACIONANDO PRESSÃO (BARS) E TEMPERATURA (K). 46
FIGURA 14 - TAMANHO E ÓRBITA RELATIVA DO SISTEMA PLANETÁRIO GLIESE 581 52

FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE ALBEDO E A INCLINAÇÃO DO PLANETA (°) PARA QUATRO TIPOS DE COMPOSIÇÃO PLANETÁRIA COM O OBJETIVO DE DETERMINAR A PRESENÇA OU AUSÊNCIA DE UMA ATMOSFERA NO PLANETA GJ-876 D. 54
FIGURA 16 - VISTA ARTÍSTICA DO SISTEMA COROT-7 57
FIGURA 17- ESTRUTURA INTERNA DO COROT-7 B COMPARADO A TERRA. 58
FIGURA 18 - SISTEMA KEPLER-11 F 59
FIGURA 19 - VISTA ARTÍSTICA DO SISTEMA GLIESE 876. 61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TEMPERATURAS DOS PLANETAS ESTUDADOS EM K E ºC. 23

TABELA 2 – TIPOS DE EXTREMÓFILOS 38

TABELA 3 - TIPOS DE EXTREMOFILIA. 39

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO EM VOLUME (%) DOS ELEMENTOS PRESENTES NA CROSTA CONTINENTAL E NA BSE. O TOTAL É MENOR QUE 100% POR QUE O NI NÃO É CONSIDERADO. ..44

TABELA 5 – COMPOSIÇÃO DA KOMATIITE E DO BSE UTILIZADA PARA O MAGMA..... 48

TABELA 6 - ESTIMATIVA DA BIODIVERSIDADE MICROBIANA. 56

SUMRIO

1. INTRODUÇÃO 11

1.1. Astrobiologia 11

1.2. Exoplanetas 13

1.3. Zona Habitável 14

1.4. Rotação planetária e dinâmica 16

2. OBJETIVOS 17

3. MATERIAIS E MÉTODOS 18

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 19

4.1. Habitabilidade e fatores ambientais e astrofísicos 19

4.2. Temperatura 21

4.3. Atmosfera 24

4.4. Outros fatores que interferem na temperatura 27

4.5. Biomarcadores 29

4.6. Extremófilos 31

4.6.1 O Domínio Archaea 31

4.6.2 Extremófilos e seus habitats 37

4.6.3 Termófilos e suas características 39

4.7. Exoplanetas com Rotação Síncrona 42

4.7.1 CoRot-7 b 42

4.7.2 Kepler-11 f e Kepler-9 d 47

4.7.3 Gliese 581 g 49

4.7.4 Gliese 876 d 53

5. CONCLUSÃO 56

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIAS 63

1. Introdução

1.1. Astrobiologia

A astrobiologia, ciência que estuda a origem, evolução, distribuição e futuro da vida, tem como escopo a procura por vida em outros ambientes, como por exemplo, em exoplanetas. Para procurarmos vida em outros planetas, temos que delimitar características comuns encontradas em todos os seres vivos conhecidos e partirmos da suposição de que a vida extraterrestre compartilha essas características com a vida na Terra. Desse modo, segundo Kaltenegger et al. (2008) a presença de água como solvente, uma química baseada no elemento carbono e a existência fora do equilíbrio termodinâmico são consideradas essenciais para todas as formas de vida encontradas na Terra, em especial para os organismos microscópicos que apresentam uma simplicidade e uma maior facilidade de adaptação. Sendo assim, quando se procura um ambiente extraterrestre habitável, procura-se por um ambiente que apresente essas características.

Um importante fator que precisamos considerar é que os organismos estão inseridos em ambientes onde são submetidos a ações simultâneas de temperatura, pressão, umidade, radiação, etc. O conjunto de relações entre um organismo e seu meio é chamado de ecossistema. Em um ecossistema há a entrada e saída de matéria e energia, construindo um ciclo de reciclagem, onde a matéria e energia são consumidas, eliminadas, transformadas e consumidas, iniciando o ciclo novamente. Todo organismo vivo requer um ambiente propício para se desenvolver e perpetuar. O único ambiente que permitem a existência vida que conhecemos atualmente é a Terra.

Habitabilidade, segundo Lammer (2009) é definida como "adequação para viver em (ou no)", nesse sentido um ambiente habitável seria um local onde a vida poderia existir atualmente, ter existido no passado ou poderá existir no futuro. Isso não significa que necessariamente há vida nesses locais, apenas significa que a vida poderia habitar ali.

A habitabilidade de exoplanetas é um assunto há tempos investigada em detalhes. Propriedades químicas de atmosfera planetárias podem revelar bioindicadores de vida similares às formas de vida na Terra. A detectabilidade de tais indicadores está sendo investigada por vários autores[1].

[1] Cf. KALTENEGGER; SELSIS, 2008 e BEAN et al., 2010

A grande diversidade de organismos encontrados na Terra compõe um leque de opções e diferenças. Por exemplo, um organismo que vive no Ártico apresenta características que foram selecionadas durante sua evolução, que permitiram que ele resistisse às baixas temperaturas. Já um organismo que vive dentro de um vulcão, por exemplo, teve características diferentes selecionadas, como resistência a calor. Todos esses organismos que vivem nesses extremos de temperatura, pressão, pH, radiação, quantidade de nutrientes, etc., são importantes contribuintes para construirmos uma escala de extremos das necessidades de um ambiente para que esse seja considerado habitável. Assim, para um ambiente ser considerado habitável, considerando os organismos conhecidos na Terra, ele pode apresentar uma temperatura entre -18C até 113ºC, uma quantidade de nutrientes de até 1 mgL^{-1}([2]) de carbono dissolvido (o que é muito pouco se considerarmos um ser humano, ou qualquer organismo superior), pode apresentar um pH ácido de 0 até um pH básico de 12.5, (HENDRY, 2010) uma pressão de 1.1 tons cm^{-2} (CAVICCHIOLI, 2002), uma composição atmosférica de CO_2 (gás carbônico) puro e uma solução aquosa de 4-5 M de NaCl (organismos que conseguem viver em um ambiente com concentração salina elevada)[3] (COCKELL, 1999). Dependendo dessas características, diferentes organismos, com diferentes mecanismos de resistência podem existir. Por exemplo, alguns micro-organismos conseguem viver em pH ácido (pH 0) e outros organismos conseguem viver em um ambiente básico (pH 12,5). Esses organismos com características extremas são chamadas extremófilos.

Grande parte dos extremófilos é encontrada no domínio *Archaea*, e apresentam características comuns entre si que diferem dos organismos encontrados em outros domínios e também apresentam características específicas peculiares (SANTOS et al., 2001). O estudo desses micro-organismos e dos ambientes extremos em que esses vivem, fornecem informações importantes e parâmetros de comparação para procurarmos ambientes extraterrestres que conseguiriam suportar a vida. Assim, procuramos exoplanetas que apresentem propriedades dentro dessas variações. Caso sejam encontrados na Terra, organismos com características mais extremas, isto é, que apresentam alguma propriedade que não esteja dentro dos parâmetros listados acima, o leque de opções na procura por vida extraterrestre será ampliado.

---

[2] $Mg\ L^{-1}$ = 0,001 g/L ;

[3] M = Molar (mol/litro);

1.2. Exoplanetas

Exoplanetas são planetas que estão fora do sistema solar, deste modo eles se localizam há muitos anos luz da Terra, dificultando a sua identificação e a aquisição de informações sobre as suas propriedades. Esses planetas são identificados atualmente por meio indiretos, sendo a velocidade radial e fotometria os métodos mais utilizados (KALTENEGGER et al., 2008 e exoplanet.eu). Com esses métodos consegue-se obter informações importantes sobre planetas próximos das estrelas.

Os primeiros exoplanetas descobertos eram considerados "Júpiter" orbitando estrelas pequenas (i.e., com massa menor que a do Sol) com período orbital menor que o de Mercúrio. Esses são os chamados Júpiters-quentes, devido à proximidade com a estrela. Com o avanço das técnicas de detecção, planetas menores que Júpiter (tal como Urano), e com períodos orbitais maiores (da ordem de meses), começaram a ser detectados. Atualmente, "Super-Terras" (i.e., planetas com massa da ordem de 10 massas terrestres), com períodos de poucos dias e mais recentemente inúmeras "Super-Terras Quentes" (STQ)[4], com períodos orbitais da ordem de poucas semanas estão sendo detectados.

Através de modelos teóricos que pressupõem alguns parâmetros gerais (composição da superfície planetária, elementos químicos presentes na atmosfera) pode-se criar um ambiente possível para o exoplaneta. Por exemplo, Miguel et al. (2011) mostra situações de cinco tipos possíveis de atmosferas para os planetas detectados pelo telescópio Kepler. Uma hipótese deste trabalho é que a composição inicial das Super Terras Quentes (que é o caso dos candidatos do Kepler) é a mesma composição da Komatiite (rochas ultramáficas)[5], concluindo que uma dessas cinco atmosferas era a mais provável de existir nos candidatos a planetas identificados pela sonda Kepler.

Questões relacionadas com existência e estabilidade de uma atmosfera planetária são também essenciais no contexto de habitabilidade (BARAFFE et al. 2010). A composição da atmosfera de um exoplaneta é muito importante para delimitar a habitabilidade do planeta, já que a atmosfera pode apresentar diferentes características e influenciar o planeta de

[4]Super Terras quentes – Planeta extrassolar que tem uma massa maior que a massa da Terra, mas menor do que 10 vezes a massa da Terra e que apresenta um período orbital de poucos dias, estando muito próximo da sua estrela.

[5]Cf. Seção 4.7.2 deste trabalho

diferentes maneiras dependendo dos compostos presentes. Na atmosfera terrestre encontramos diferentes compostos que são produzidos tanto abioticamente quanto bioticamente.

Compostos produzidos bioticamente são importantes indicadores da presença de vida na Terra. Sendo assim em uma atmosfera extraterrestre, procuramos compostos ou conjunto deles que quando presentes em abundância sugerem uma origem biológica, os chamados biomarcadores[6].

1.3. Zona Habitável

Outro tópico relacionado com o conceito de habitabilidade é Zona Habitável. A zona habitável (Habitable Zone - HZ) é definida como a região ao redor de uma estrela em que é possível que haja água líquida na superfície do corpo celeste e que não seja quente demais para que essa água evapore ou fria demais para que a água congele. A zona habitável delimita os planetas que poderiam ser habitáveis, já que define condições físicas da superfície planeta que permite um ambiente propício para a vida. Entretanto, isso não significa que apenas os planetas presentes na HZ podem ter vida, já que pode haver ambientes fora da HZ em que a vida pode ser possível, como é o caso de ambientes abaixo da superfície, onde organismos como os quimiolitotróficos[8] podem sobreviver (KALTENEGGER et al., 2008). Esses seres são organismos que não precisam da energia estelar para conseguir sobreviver, eles utilizam compostos químicos inorgânicos como fonte de energia.

Por meio de modelos computacionais, Kasting et al. (1993) propôs uma relação massa da estrela/distância (figura 1). Nesse modelo Kasting delimitou a Zona habitável, descrita pela linha contínua. As linhas tracejadas indicam a região ao redor da estrela onde planetas terrestres são formados. A linha pontilhada indica a distância em que planetas com uma órbita circular apresentam a sua rotação síncrona como resultado do amortecimento proporcionado pela força da maré.

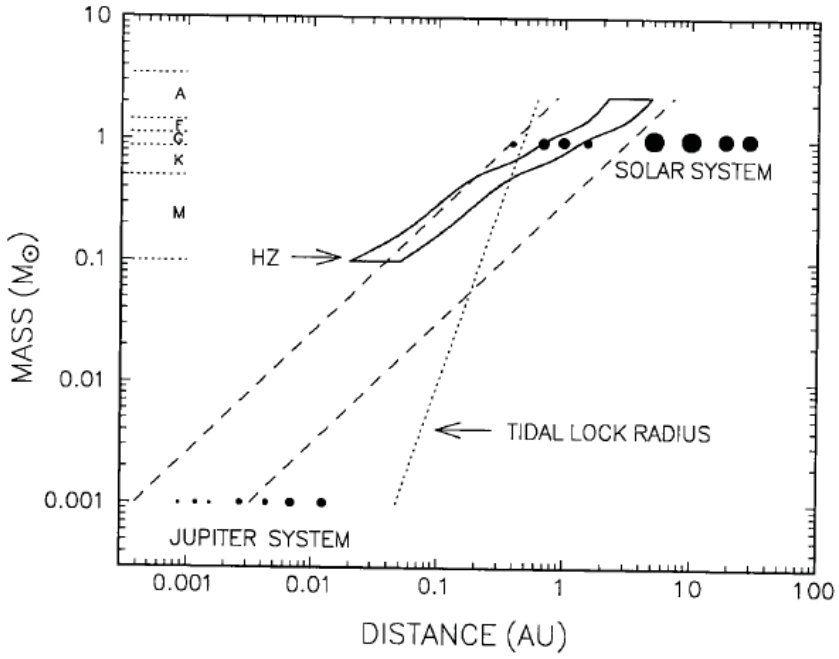
---

[6] Cf. Seção 2.5 deste trabalho.

[7] Cf. SELSIS et al. 2008, LAMMER et al. 2009, VALENCIA et al. 2011

[8] Quimiolitotróficos – Organismos procariontes cujo metabolismo não depende da luz estelar. A energia é obtida a partir da oxidação de compostos inorgânicos e os aceptores de elétrons podem ser o oxigênio ou o nitrito. Devido a isso não se espera que esses organismos modifiquem muito o ambiente planetário.

Figura 1 - Figura relacionando a massa da estrela com a sua distância à estrela.



Fonte: Kasting et al. (1993).

As “Super Terras Quentes” são planetas que apresentam uma distância orbital (semi-eixo maior) pequena, entre 0.006 e 0.1 AU. Devido a isso as únicas “Super Terras Quentes” presentes na HZ são aquelas que orbitam estrelas do tipo M. Outro fator que deve ser considerado é que a maioria dos planetas que estão na HZ e orbitam estrelas mais frias que estrelas semelhantes ao Sol (G), apresentam rotação síncrona. Isso é um fator que influencia na habitabilidade do planeta, já que esses planetas apresentariam um lado da sua superfície iluminada pela estrela e o outro lado não iluminado, tendo uma discrepância de temperatura[9].

As estrelas do tipo G apresentam uma temperatura efetiva entre 5000-6000K e uma massa de aproximadamente 1 M_{sun}[10] sendo iguais ao nosso Sol. Já as estrelas do tipo M, são estrelas mais frias que apresentam uma temperatura efetiva entre 2000-3000K e uma massa aproximadamente de 0.4 M_{sun}.

As estrelas presentes na sequência principal aumentam sua luminosidade durante a sua vida (KASTING, 1993). Nesse caso a região ao redor da estrela que poderia manter água líquida não é constante, sendo que durante a evolução estelar essa zona habitável fica mais distante da estrela já que esta ganha mais luminosidade.

[9] Cf. Seção 4.2. deste trabalho

[10] M_{sun} - Massas do Sol

1.4. Rotação planetária e dinâmica

A rotação dos exoplanetas é muito importante para delimitação da habitabilidade. A maioria dos planetas identificados até hoje são planetas considerados "quentes". Esses planetas são mais fáceis de serem achados já que se encontram mais próximos da estrela, apresentando um sinal maior e mais frequente (KALTENEGGER et al., 2008). A proximidade da estrela sugere que eles apresentam uma rotação afetada pela força das marés, sendo assim a taxa rotacional do planeta é fortemente reduzida. A diminuição da taxa de rotação pode levar a um processo de sincronismo, onde uma das fases do planeta será constantemente iluminada pela estrela, enquanto o outro lado não receberá a energia direta da estrela-mãe. Nesse caso, a temperatura de um lado do planeta será elevada enquanto a do outro lado será muito reduzida, o que resulta em uma atmosfera tênue e a inexistente de um oceano líquido estável (KALTENEGGER et al., 2008). Variações na excentricidade orbital e na obliquidade, de um exoplaneta também podem influenciar na variação climática do planeta (SPIEGEL et al., 2010).

É bem conhecido que dentre os 838 planetas (em 29/09/2012) não pertencentes ao Sistema Solar existe uma enorme diversidade de arquiteturas em relação ao nosso Sistema (BARAFFE et al. 2010). Por exemplo, por simples inspeção dos catálogos dados no site exoplanet.eu vemos que 429 dos 838 planetas possuem período orbital menor que 88 dias. Esse valor é, aproximadamente, o período orbital do planeta Mercúrio. Assim, vemos que cerca de 51% de todos os exoplanetas conhecidos orbitam suas respectivas estrelas em órbitas bem compactas (i.e., muito próximas da estrela). Portanto, é claro que, quando comparado ao caso do Sistema Solar, os exoplanetas encontrados em tornos de outras estrelas podem ser bem distintos, em termos de distribuição orbital, que os planetas do Sistema Solar.

2. Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo a delimitação do que torna um planeta extrassolar do tipo terrestre habitável. Delimitaremos quais características são relevantes para determinar a habitabilidade, isto é, a existência e desenvolvimento de vida. A partir disso tentaremos identificar essas características nos exoplanetas CoRoT-7 b, Kepler-9 d, Gliese 876 d, Kepler-11 f e Gliese 581 g. Analisaremos quais os indicativos encontrados em um exoplaneta, que permite a determinação da sua habitabilidade (LAMMER et al., 2009). Serão analisados dados da atmosfera (LAMMER et al., 2008), ciclos geoquímicos (SPIEGEL et al., 2010), tamanho, raio, massa, variação orbital, distância da estrela-mãe, pressão, densidade, luminosidade, temperatura, radiação recebida, velocidade de escape. Para isso, teremos que interligar os conhecimentos biológicos, evolutivos, geoquímicos e físicos conhecidos da Terra, que atualmente é o único planeta conhecido que tem vida, com os dados que se pode obter de um exoplaneta, como por exemplo, o seu espectro de baixa resolução, no infravermelho, ou no visível (KALTENEGGER et al., 2008).

Após a delimitação do nível de habitabilidade dos exoplanetas CoRoT-7 b, Kepler-9 d, Gliese 876 d, Kepler-11 f e Gliese 581 g, faremos uma discussão mais aprofundada relacionando as variações orbitais desses planetas com a habitabilidade do exoplaneta. Relacionaremos os organismos que habitam a Terra atualmente e que poderiam sobreviver nesse ambiente (CAVICCHIOLI, 2002; TRENT, 2000; SANTOS et al., 2001).

3. Materiais e métodos

Para esse trabalho analisaremos a bibliografia existente sobre o assunto e com isso recuperar o conhecimento científico acumulado sobre habitabilidade, exoplanetas, atmosferas extraterrestres e variação orbital. Após essa revisão e delimitação da habitabilidade, analisaremos dados da atmosfera (LAMMER et al., 2008), ciclos geoquímicos (SPIEGEL et al., 2010), tamanho, raio, massa, variação orbital, distância da estrela-mãe, pressão, densidade, luminosidade, temperatura, radiação recebida, velocidade de escape já publicados em relação aos cinco exoplanetas CoRoT-7 b, Kepler-9 d, Gliese 876 d, Kepler-11 f e Gliese 581 g. Através dos dados previamente abordados em Callegari et al. (2011), faremos uma discussão de como a variação orbital influencia na habitabilidade do planeta. Após essa discussão, analisaremos quais micro-organismos citados em Cavicchioli (2002) conseguiriam habitar o ambiente encontrado nesses planetas.

4. Resultados e Discussão

4.1. Habitabilidade e fatores ambientais e astrofísicos

Dole (1964) propôs que um planeta habitável deveria apresentar um ambiente passível de manter a vida humana em sua forma natural. Nesse caso, os planetas habitáveis deveriam apresentar características como temperatura, gravidade, luminosidade, composição e pressão atmosférica, água e outros requisitos específicos para manter a vida humana. Entretanto, considerando uma definição de vida mais abrangente, contemplando os extremos de resistência, ou seja, organismos que conseguem resistir a condições ambientais mais divergentes e extremas, pode-se definir "habitável" como um local com a presença de água líquida (KASTING, 1993). Existe ainda uma terceira definição que contempla as duas definições anteriores, a definição de Fogg, (1992), a qual definiu como "biocompatível" os planetas que apresentavam água líquida e "Habitável" para os planetas adequados para os humanos.

Essas três definições podem ser usadas dependendo do que se procura em um exoplaneta. Se o interesse é a procura por um ambiente propício para a ocorrência do homem, ou se é a procura por vida semelhante aos organismos "superiores" encontrados na Terra, então a definição de Dole e Fogg são mais apropriadas. Entretanto, se o interesse é identificar planetas que possam ter sido um berço para a origem da vida, ou ainda um ambiente adequado para a permanência e quem sabe evolução da vida de uma maneira mais ampla, então a definição de Kasting et al. (1993), entre outros autores, é a mais apropriada.

Nesse trabalho partiremos do conceito de "habitável" proposto por Kasting et al. (2003), E desse modo, a Zona Habitável seria a região ao redor da estrela mais apropriada para apresentar planetas habitáveis.

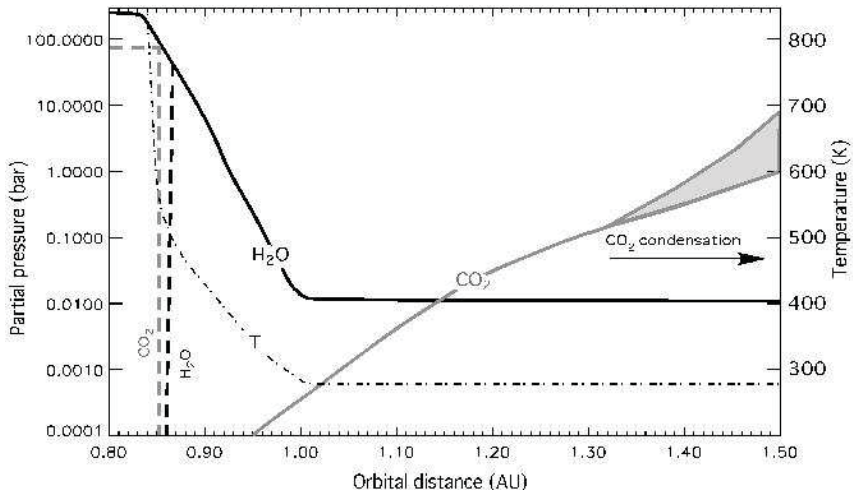
Como sabemos o universo está repleto de água, sendo que a maior dificuldade para haver água líquida no planeta é a temperatura e a pressão. Assim, o efeito estufa e o albedo[11] do planeta são importantes fatores para a manutenção da temperatura, da maneira que, dependendo de algumas características do planeta, o seu efeito estufa e seu albedo variam. O albedo varia em função da distribuição de uma cobertura de gelo, neve e nuvens (KASTING et al, 1993). Já o efeito estufa está intimamente relacionado com a atmosfera, assim dependendo da densidade da atmosfera, o calor absorvido da estrela é retido no planeta

[11] Albedo - Índice de refletividade. Medida relativa da quantidade de luz refletida, isto é medida da reflectividade da superfície de um corpo.

aumentando a temperatura de superfície. Os gases mais importantes para o efeito estufa são o CO_2 (dióxido de carbono) e a H_2O (água), sendo que o efeito estufa se intensifica com a elevação da temperatura de superfície, ocasionada pelo aumento do vapor de água atmosférico. Caso o planeta tenha um montante de CO_2 elevado, a atmosfera deste planeta poderá ser densa (como a atmosfera de Vênus), e assim a temperatura do planeta será elevada já que grande parte da radiação absorvida continuará na superfície do planeta. O albedo é reforçado com o frio por causa do aumento da cobertura de neve e de gelo. Em planetas cobertos de gelo, o índice de refletividade é elevado, isto é, o planeta reflete boa parte da radiação absorvida, nesse caso a temperatura do planeta irá diminuir (KASTING, 2003).

A quantidade de CO_2 presente na atmosfera de um planeta semelhante à Terra, isto é, que tenha o ciclo carbono-silicato, bem como a quantidade de H_2O, depende da sua distância orbital. A fronteira interna da HZ pode apresentar H_2O na sua superfície ou esta H_2O foi perdida para o espaço por evaporação. Em contrapartida, toda a região fora da HZ, incluindo a sua fronteira externa esta repleta de CO_2. Com isso Kaltenegger, L. e Selsis, F., em 2008, adaptaram os dados de Kasting et al.1993 e Forget et al.1997 e propuseram a figura 2 abaixo:

Figura 2 - Relação da pressão parcial de CO_2 e H_2O e da temperatura de superfície com a distância orbital.



Fonte: Kaltenegger, et al. (2008) (adaptado de KASTING et al., 1993 e FORGET et al., 1997).

A figura 2 indica a relação da pressão parcial de CO_2 e H_2O (lado esquerdo) e da temperatura de superfície (lado direito) com a distância orbital (em Unidades Astronômicas - AU). Quanto mais distante da estrela, menor a temperatura, maior a concentração de CO_2 (abundância de CO_2 fora da zona habitável) e menor a concentração de H_2O (evapora e é perdida para o espaço).

Com isso Kaltenegger propôs que:

- Para um planeta com distância maior que 1 AU, o planeta deve ter um oceano de água superficial, equilíbrio com uma temperatura de 290K, e um ciclo carbono-silicato que controla a quantidade de CO_2;
- Para planetas com uma distância maior que 1,3 AU, o CO_2 condensa, formando nuvens de CO_2 que modificam a temperatura (Vênus – grande efeito estufa);
- Para planetas com uma distância menor que 0,93AU, a H_2O se torna abundante na atmosfera e logo se perde para o espaço, após a fotólise por UV;

Segundo Kasting et al. (1993), Hart (1978) foi o primeiro autor a utilizar a evolução estelar como variável para a habitabilidade de um planeta. Hart concluiu que se a Terra tivesse se formado a uma distância de 0,95 AU do Sol, ela sofreria com um efeito estufa descontrolado. Entretanto se a Terra tivesse se formado a uma distância de 1.1 AU do Sol, ela sofreria um efeito de glaciação descontrolado. Analisando esses dois limites Hart (1978) definiu como "Zona habitável contínua" a região entre esses dois limites (glaciação e efeito estufa descontrolado), isto é, a região ao redor da estrela que permanece habitável por um período de tempo finito.

Além da distância do planeta até uma estrela, há outros fatores importantes que devem ser considerados para supor um ambiente em um exoplaneta.

4.2. Temperatura

Outro importante fator para a habitabilidade de um planeta é a sua temperatura, sendo a radiação estelar a principal fonte de energia térmica de um planeta terrestre. A temperatura de um planeta depende diretamente do fluxo de radiação oriundo da sua estrela. Dependendo do tipo de estrela (G, M, K) o planeta vai receber um fluxo de radiação diferente que irá aquecer a sua superfície. Essa radiação pode ser absorvida pela atmosfera resultando no aquecimento do planeta, ou pode ser refletida. A radiação estelar que é absorvida pela

atmosfera e pela superfície refere-se à energia que entra no planeta. A radiação solar que não é absorvida, ou seja, a radiação refletida é a energia que sai do planeta. A energia pode ser derivada também do interior do planeta, no entanto em quantidades insignificantes.

Quando o planeta atinge certo equilíbrio, a temperatura não muda mais. Esse equilíbrio é alcançado quando a temperatura absorvida e a emitida estão balanceadas.

A temperatura efetiva do planeta geralmente não é igual à temperatura da superfície do planeta, porque os fatores relevantes para o cálculo da temperatura efetiva são diferentes dos fatores calculados para temperatura de superfície. Para efeito de comparação a temperatura efetiva da Terra é de aproximadamente 255K e a temperatura de superfície é aproximadamente 288K.

Os gases presentes na atmosfera do planeta são um importante fator que influencia na temperatura do planeta. Um planeta que tem uma atmosfera com gases do efeito estufa irradia a energia absorvida de volta para o espaço muito mais lentamente do que uma atmosfera sem esses gases. Quando a quantidade de gases do efeito estufa for muito grande, a temperatura desse planeta será muito mais elevada do que a de um planeta sem gases do efeito estufa, para ilustrar isso podemos comparar a temperatura de Vênus com a de Marte. Vênus apresenta na sua atmosfera uma quantidade muito grande de CO_2 e vapor de H_2O, nesse caso a temperatura da superfície do planeta é 500K maior do que a temperatura efetiva (227K); já Marte não tem uma quantidade tão grande de gases do efeito estufa na sua atmosfera e nesse caso a sua temperatura de superfície é muito próxima da temperatura efetiva (217K). A Terra tem a quantidade de efeito estufa suficiente (aproximadamente 30K) para manter uma temperatura de equilíbrio aproximada de 288K, o que permitiu que a vida se desenvolvesse.

Léger et al. (2009), Barnes et al. (2010) e Miguel (2011) propuseram uma fórmula que define a temperatura de equilíbrio dos planetas presentes no sistema CoRoT e dos Keplers respectivamente. Nesse trabalho, todos os planetas analisados apresentam uma rotação síncrona, o que significa que um lado estará constantemente recebendo radiação direta da estrela, enquanto o outro lado não estará recebendo nenhuma energia direta da estrela. Nessas situações, existe a possibilidade de ocorrer o transporte de calor do lado iluminado para o lado escuro. Esse transporte permite que a temperatura no lado iluminado seja menor e a temperatura do lado escuro seja maior (Léger, 2009). Nesse caso, para determinar a temperatura de equilíbrio de um planeta é necessário considerar se haverá transporte de calor do lado iluminado para o lado escuro ou não. As variáveis que devem ser analisadas são o albedo do planeta (A), o raio e a temperatura da estrela (R), distância em que o planeta se encontra da estrela (a) e o efeito estufa do planeta (G).

Se considerarmos a existência de transporte de calor, ocasionando um equilíbrio na temperatura do planeta, utilizamos a fórmula I. Caso não haja o transporte de calor, consideramos a fórmula II. A temperatura resultante será referente ao lado iluminado pela estrela. Para os cálculos aqui realizados consideramos A = 0.01 (MIGUEL et al., 2011), G = 1 (LÉGER et al., 2009).

$$(T_{pl1}) = (1 - A)^{1/4} G(R*/2a)^{1/2}\ T*.$$

$$(T_{pl2}) = (1 - A)^{1/4}\ G\ (R*/\ a)^{1/2}\ T*.$$

Utilizando essas fórmulas temos que as temperaturas dos planetas analisados nesse trabalho são:

Tabela 1 - Temperaturas dos planetas estudados em K e ºC.

Planeta	Com transporte de calor em K	Sem transporte de calor em K	Com transporte de calor em ºC	Sem transporte de calor em ºC
CoRot-7 b	1821K	2575 K	1548ºC	2302ºC
Kepler-9 d	1747K	2471 K	1474ºC	2198ºC
Gliese 876 d	670K	948 K	397ºC	675ºC
Kepler-11 f	573K	810 K	300ºC	537ºC
Gl-581 g	237K	336 K	-35ºC	63ºC
55 Cnc e	1943K	2748 K	1670ºC	2475ºC

Fonte: Produzida pelos autores.

Esses planetas, devido a sua proximidade da estrela, apresentam uma temperatura muito elevada, o que dificulta a existência de algum tipo vida como conhecemos aqui na Terra. O único planeta que, segundo essas fórmulas, apresentaria uma temperatura relativamente semelhante à Terra é o Gl-581g.

Para o lado não iluminado pela estrela devemos considerar o esfriamento pela radiação e os diferentes mecanismos alternativos de aquecimento. Esses mecanismos podem ser o fluxo geotérmico, possivelmente o fluxo de maré e o aquecimento pelo plasma estelar (LÉGER, 2011).

O fluxo geotérmico corresponde à transferência de calor do interior de um planeta para o seu exterior, supondo-se que o interior esteja mais quente do que a região externa do planeta (SILVA, 2006). O aquecimento de maré consiste no aquecimento por fricção do interior de um planeta, devido à flexão causada pela força gravitacional do planeta primário e dos eventuais planetas vizinhos (DUARTE et al., 2001). A corona estelar pode ser descrita como uma fina atmosfera com uma temperatura de $\approx 10^6$K e uma emissão radioativa de 10^2wm-2 (WITHBROE et al 1977).

4.3. Atmosfera

Para procurar por sinais de vida é necessário entender a atmosfera dos planetas, sendo a temperatura e o raio do planeta, essenciais para se compreender os processos químicos e físicos que ocorrem no planeta (tectonismo, perda de H_2 para o espaço) (KALTENEGGER et al., 2008). A atmosfera também é de suma importância para se entender o quanto o planeta consegue absorver de energia e refletir dessa energia, o que influenciará na habitabilidade do planeta.

A atmosfera é resultado da vaporização/sublimação de rochas na superfície do planeta (LÉGER, 2011). No que diz respeito à atmosfera terrestre, a H_2O e o CO_2 são os elementos mais importantes para o efeito estufa, seguidos pelo CH_4, N_2O, O_3 e CFCs (KASTING et al., 2003). O CO_2 é uma importante molécula na atmosfera, já que este elemento está intimamente relacionado com o efeito estufa. Existem dois ciclos que controlam essa quantidade de CO_2, o ciclo do carbono orgânico e o ciclo do carbono inorgânico (KASTING et al., 2003).

O ciclo do carbono orgânico consiste na conversão, pelas plantas, do CO_2 e da água em matéria orgânica e O_2, no processo chamado de fotossíntese ($CO_2 + H_2O \rightarrow CH_2O + O_2$). A respiração balanceia a fotossíntese liberando CO_2 e H_2O. Este ciclo não é o principal controlador da quantidade de CO_2, já que todo o CO_2 assimilado é eliminado na mesma proporção - fotossíntese/respiração.

O ciclo do carbono inorgânico (carbono-silicato) é o ciclo mais importante para controlar a quantidade de CO_2 presente no planeta. Para explicarmos o ciclo usaremos o $CaSiO_3$ (wollastonite) como representante de todas as rochas silicato.

O ácido carbônico é um composto formado por meio da reação do CO_2 com a água da chuva. Devido ao forte poder de corrosão que o ácido carbônico (H_2CO_3 – ácido fraco) tem sobre as rochas silicatos, quando analisamos por um longo período de tempo, esse ácido pode dissolver rochas de silicato (é forte o suficiente para isso).

A superfície da Terra e de muitos outros planetas é composta por rochas de silicato, de modo que a sílica é um dos compostos mais importantes no solo, sendo encontrado na forma de $CaSiO_3$. O intemperismo é o processo responsável pela degradação e enfraquecimento das rochas, no caso das rochas de sílica o intemperismo é responsável pela seguinte reação:

$$CaSiO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca^{++} + SiO_2 + HCO_3^-$$

Essa reação ocorre naturalmente na presença de H_2O líquida e CO_2, sendo necessária uma temperatura e pressão adequadas para que a água seja mantida no estado necessário. O consumo de CO_2 influencia na temperatura do ambiente, por que o CO_2 é um composto que, quando presente na atmosfera, impede a saída os raios solares que entraram na Terra.

Para produzir as suas conchas, os foraminíferos, animais em sua maioria marinhos, utilizam dos produtos da reação acima, resultando em uma estrutura (chamada de teca) calcária ($CaCO_3$). Por meio dessa reação ocorre o retorno do CO_2 para a atmosfera. Esse CO_2 pode retornar para a atmosfera de maneira abiótica, caso exista uma grande quantidade de HCO_3^- no solo na reação descrita abaixo:

$$Ca^{++} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$$

A combinação do intemperismo do silicato com a precipitação do carbonato é representada pela fórmula:

$$CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + SiO_2$$

Em altas temperaturas e pressões (em vulcões, por exemplo) a reação de intemperismo e consumo de CO_2 pode ser modificada, nesse caso, haverá um consumo de óxido de sílica e carbonato de cálcio e liberação de $CaSiO_3$ e CO_2. Esse CO_2 retorna a atmosfera aumentando a temperatura global, na reação demonstrada abaixo:

$$CaCO_3 + SiO_2 \rightarrow CaSiO_3 + CO_2$$

Se o ciclo do carbono-silicato fosse a única reação que ocorresse para controlar o CO_2 presente na atmosfera, todo o CO_2 da Terra eventualmente estaria armazenado em reservatórios de rochas carbonadas, tornando o planeta inabitável. Felizmente existem outras reações que controlam o CO_2 na Terra.

O fundo do mar está constantemente em movimentação (teoria da tectônica de placas), o que acarreta na formação de cumes no meio do oceano, sendo subdivido nos limites de certas placas quando a densa placa oceânica mergulha sob a placa continental menos densa. Quando isso acontece, os sedimentos de carbonato sobrepostos são carregados para o fundo, onde existe uma temperatura e pressão elevadas. Nessas condições o mineral de carbono se recombina com o SiO_2 para refazer o mineral silicato e liberar CO_2 no processo (carbonato metamorfizado), que entra na atmosfera através do vulcanismo. Esse ciclo repõe todo o CO_2 em aproximadamente meio milhões de anos (KASTING, 2003).

Os planetas com uma atmosfera com baixa opacidade e que não tem uma profundidade óptica grande apresentam o chamado ESWI (Instabilidade no intemperismo reforçada no ponto subestelar) proposto por Kite et al. (2011). Esse processo consiste basicamente em um intemperismo que ocorre no ponto subestelar (ponto na superfície do planeta em que a estrela-mãe está no Zênite), em planetas com rotação síncrona. Geralmente, o intemperismo gera um aumento na pressão atmosférica e consequentemente um aumento na temperatura. Caso aconteça um aumento no transporte de calor para longe do ponto subestelar, ocorrerá um resfriamento nessa região. Isso ocorre porque quando o intemperismo acontece e há aumento da pressão, há a formação de uma atmosfera. Essa atmosfera permitira um maior transporte de calor da região iluminada para a região não iluminada.

Nesse caso, o intemperismo, que age na Terra como um fator de elevação da temperatura, agirá como um fator de resfriamento nesses planetas. Com a diminuição da temperatura ocorre uma diminuição do intemperismo. Devido a essa diminuição, os gases liberados nos vulcões, que antes eram consumidos pelo intemperismo, agora se acumulam e o CO_2, liberado nessa reação, aumentará a pressão atmosférica e consequentemente a temperatura. Essa instabilidade acarreta em um efeito estufa muito forte. (KITE, 2011).

O vapor de H_2O na atmosfera se comporta diferente do CO_2, sendo esse o responsável por ≈2/3 do aquecimento enquanto o CO_2 é responsável por ≈ 1/3 (KASTING, 2003). Isso ocorre porque na atmosfera, a temperatura média se equivale à temperatura de condensação da H_2O, assim a H_2O apresenta uma retroalimentação quase instantânea. Quando o clima esfria, a água condensa, resultando em uma diminuição na pressão de vapor e consequentemente, diminuição da concentração de vapor de água na atmosfera. Menos vapor

de água resulta em um menor efeito estufa, o que gera um resfriamento. Quando o clima esquenta a quantidade de H_2O aumenta e assim aumenta o efeito estufa, amplificando o aquecimento inicial (KASTING et al., 2003).

Os aerossóis também podem influenciar a temperatura de um planeta. O aerossol é uma suspensão de pequenas partículas sólidas ou gotículas de líquido na forma de gás que absorvem energia solar e refletem a luz do sol de volta para o espaço. Além disso, esse aerossol quando em contato com a água, se aglomera formando gotículas que compõem as nuvens. Quanto mais aerossóis o planeta apresentar, maior a quantidade de nuvens, sendo que estas contribuem fortemente com a temperatura do planeta, já que influenciam no seu albedo. Um planeta com muitas nuvens apresenta um índice de refletividade elevado, já que as nuvens refletem a radiação emitida pela estrela.

Nesse caso um planeta pode ter sua temperatura diminuída caso esse apresente uma quantidade elevada de aerossol e água. Em contrapartida as nuvens também tem a capacidade de esquentar a Terra, já que interceptam o calor irradiado por ela, funcionando como uma estufa, ou seja, impedindo o calor de sair da Terra. Consequentemente as nuvens contribuem para o escurecimento do planeta, o que pode contribuir para a diminuição de luminosidade recebida pelos seres fotossintetizantes que possivelmente habitariam o planeta. Em adição, as nuvens podem ser um grande problema para a análise dos biomarcadores da atmosfera do planeta, já que estas escondem as espécies moleculares da atmosfera enfraquecendo assim as linhas espectrais tanto no infravermelho quanto no visível (KALTENEGGER et al., 2008).

4.4. Outros fatores que interferem na temperatura

A neve e o gelo também influenciam na temperatura do planeta. Um aumento da temperatura resulta em uma diminuição na quantidade de neve e gelo da superfície. Com uma menor quantidade de neve/gelo na superfície há uma diminuição no albedo do planeta o que resulta na elevação da temperatura do planeta (KASTING et al., 2003).

Existe uma relação (feedback negativo) entre a temperatura do planeta com o fluxo de infravermelho. Quando a temperatura do planeta (considerando o efeito estufa) se eleva, o fluxo infravermelho aumenta. Entretanto para a Terra esfriar ela emite radiação infravermelho, quando isso ocorre o fluxo de infravermelho aumenta e a temperatura do planeta diminui.

Essa relação temperatura/fluxo de infravermelho gera um ciclo que é responsável pela estabilidade da Terra em um curto espaço de tempo. A longo prazo, os fatores que afetam o clima (L_{sun}[12]) podem variar e nesse caso esse ciclo não pode garantir uma estabilidade sozinho (KASTING, et al. 2003).

4.4.1 Variação na excentricidade

Asghari et al. (2008) investigou a dinâmica de exoplanetas em relação a zona Habitável. Através de estudos com cinco planetas ele propôs que a variação na excentricidade (e) de um planeta poderia interferir na insolação recebida por este. Nesse caso a excentricidade é um importante indicativo de habitabilidade de um planeta terrestre na HZ, sendo que qualquer valor de e>0.2 produz uma significativa diferença de temperatura em uma superfície planetária (ASGHARI, et al., 2008).

Um planeta que apresenta uma órbita circular recebe uma radiação relativamente homogênea durante todo o se movimento. Entretanto, se considerarmos um planeta com uma excentricidade na sua órbita, isto é, um planeta que durante a sua translação apresenta uma diferença entre o apoastro e o periastro, a radiação recebida no apoastro será muito menor do que a recebida no periastro, o que poderia gerar uma variação na temperatura do planeta. Planetas que estão próximos de sua estrela apresentam uma orbita mais fechada, o que caso exista essa variação de excentricidade (segundo Asghari, sendo maior que e>2), resulta em uma mudança mais rápida na temperatura. Entretanto, caso o planeta orbite uma estrela de uma região mais distante, a sua orbita consequentemente será maior, e caso exista uma excentricidade, a variação drástica de temperatura demorará mais para ocorrer. No caso dos planetas que estão próximos da zona habitável, dependendo da excentricidade, pode ter momentos durante a sua translação em que o planeta entre na zona habitável.

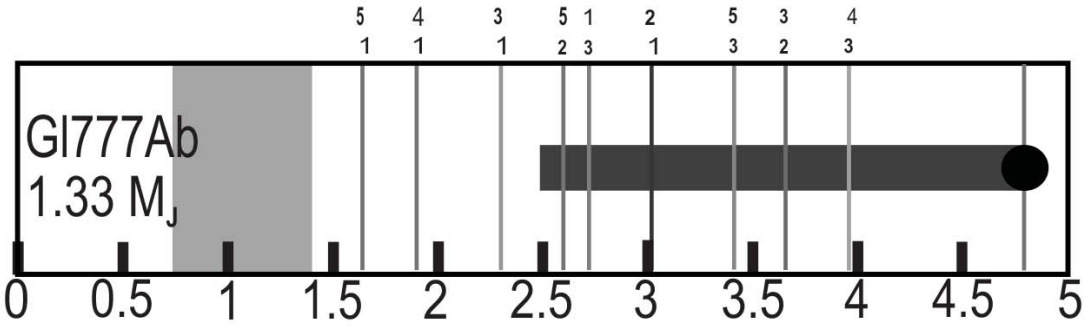
A excentricidade de um planeta pode existir devido a vários motivos. O motivo mais estudado é a perturbação de outros corpos no espaço (principalmente planetas). Assim, caso outro planeta maior esteja próximo o suficiente, a orbita do planeta menor (Super Terra) pode ser perturbada gerando uma excentricidade.

O planeta Gl 777A (gigante semelhante à Júpiter) orbita uma estrela do tipo G6 IV e apresenta um semi eixo maior de 4.8 AU.

[12] L_{sun} = Luminosidade solar

Devido a sua grande excentricidade (e=0.48) a possível região de estabilidade para outros planetas é menor que 2.4AU ou maior que 4.9 (periastro) (ASGHARI, et al., 2008).

Figura 3 – Dinâmica do sistema extrasolar Gl 777A.



Fonte: Asghari, et al. (2008) (adaptado pelo autor).

Na figura acima a região cinza claro mostra aproximadamente a posição da HZ; a barra cinza escuro indica o quão perto o planeta se aproxima da estrela central durante a sua órbita.

Como podemos observar nessa figura, o planeta (círculo escuro) apresenta uma excentricidade tão grande que durante a sua translação que consegue chegar a uma distância de ≈ 2.5 AU da estrela, o que é bem mais próximo da HZ (≈ 1,2 A.U. mais próximo) do que se o planeta apresentasse uma órbita circular.

Essa dinâmica pode ser crucial na identificação de planetas habitáveis, já que um dos fatores mais importantes que limitam os planetas habitáveis é a sua temperatura. Com análises como esta, o conceito de planeta habitável se abrangerá, e incluirá planetas que outrora não seriam considerados para estudos “astrobiológicos”.

4.5. Biomarcadores

Os Biomarcadores são definidos como os compostos ou o conjunto de compostos (elementos químicos) que quando presentes em abundância sugerem uma origem biológica. São indicativos de processos biológicos, mas também podem ser produzidos abioticamente

(KALTENEGGER et al., 2008). Os biomarcadores são analisados por meio de ondas no infravermelho e no visível, as quais são lançadas para o exoplaneta a fim de identificar o espectro do planeta. No infravermelho, cada elemento químico apresenta uma banda característica que corresponde a uma cor, e em diferentes fluxos (luminosidade da estrela) os compostos vão apresentar diferentes bandas (KALTENEGGER et al., 2008).

Quando se analisa o espectro de um planeta observam-se várias linhas espectrais que correspondem aos elementos químicos presentes na atmosfera do planeta. Os elementos químicos que de alguma forma indicam a presença de vida, são considerados biomarcadores, sendo que os candidatos mais promissores são o O_2, O_3 e CH_4, os quais podem ser detectados por uma espectrografia de baixa resolução. Os elementos que são considerados bioindicadores também podem ter uma origem abiótica, sendo importante a identificação dessas fontes para que os falsos positivos sejam encontrados.

O oxigênio é um bioindicador promissor quando em abundância. Esse é produzido bioticamente pela fotossíntese aeróbica (utiliza H_2O e energia solar para produzir energia química) e consumido através do intemperismo do carbono fossilizado, quando em contato com a superfície, e também da oxidação de gases vulcânicos reduzidos (H_2 e H_2S). Desta maneira, se não tivesse a produção biótica de O_2, esse seria totalmente consumido pelo intemperismo do carbono e não existiria na Terra. A fotossíntese e consequente o aumento do O_2, tiveram grande impacto no ciclo biogeoquímico da Terra, sendo responsável por transformações globais no ambiente terrestre, por isso o O_2 é um dos principais biomarcadores já que a sua maior produção é derivado de fontes bióticas (KALTENEGGER et al., 2008).

A produção abiótica do O_2 pode ocorrer de duas formas, durante a fotólise do CO_2 e durante a fotólise da H_2O. A fotólise do CO_2 ocorre devido a radiação UV da estrela e tem como produto uma molécula de CO e uma de O. Esse oxigênio é então combinado com outra molécula de oxigênio para formar O_2, sendo esse estado de equilíbrio mantido pela radiação UV da estrela.

Outra fonte abiótica de O_2 pode ser produzida durante a fotólise da H_2O que ocorre também devido à radiação do UV. Nesse processo uma molécula de H_2 é liberada para o espaço enquanto o oxigênio liberado se liga a outra molécula de oxigênio gerando o O_2. Essa molécula de O_2 liberada não permanece na atmosfera por muito tempo ocorrendo uma oxidação da crosta e perda de O_2 para o espaço. Assim, para planetas pequenos dentro da zona habitável, que estão muito próximas da estrela e consequentemente recebem muita radiação UV existe uma chance de ocorrer O_2 abiótico. Entretanto para planetas maiores e mais

distantes da estrela e que devido a isso recebem menos radiação UV, essa chance é insignificante. Para que a produção biótica de O_2 seja detectável é necessário que esse seja encontrado junto com gases reduzidos, visto que eles reagem rapidamente entre si. Assim, caso a fotólise ocorra na ausência de gases reduzidos e de água líquida o O_2 provavelmente terá uma origem abiótica. Em contrapartida, se encontrada uma concentração detectável de O_2, O_3 e CH_4 (por exemplo, gás redutor), possivelmente será indicativo de atividade biológica (KALTENEGGER et al., 2008).

O N_2O é produzido na Terra pelas bactérias desnitrificantes, sendo pouco encontrado na atmosfera. Devido a isso, não seria possível a identificação do N_2O em baixa resolução. Outro fator que dificultaria a identificação do N_2O é que esse só pode ser identificado na atmosfera quando encontrado em abundância e quando há pouco vapor de água na atmosfera. Em contrapartida, a vantagem desse composto é que ele quase não é produzido por processos abióticos. O nível de N_2O diminui com o aumento de O_2, já que quanto mais O_2 presente, mais ocorre a fotólise da água, e consequentemente mais hidroxilas são liberadas, dissociando o N_2O.

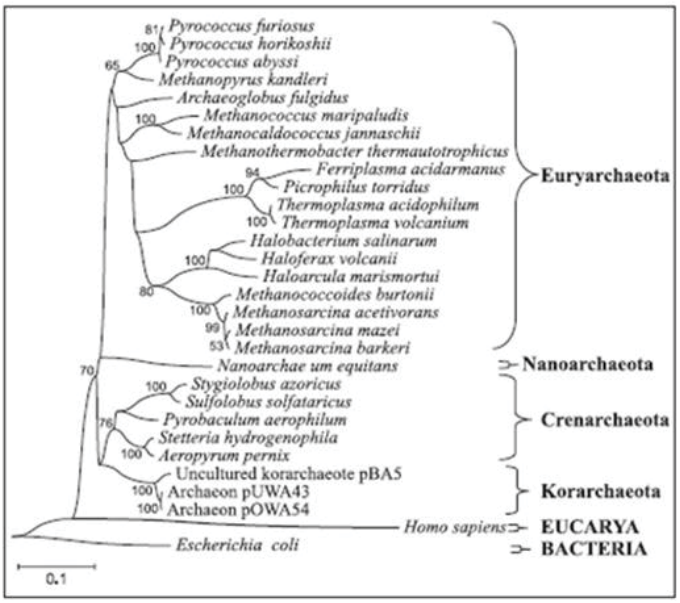
O CH_4 (metano) é facilmente detectado quando em abundância. O metano é produzido em grandes quantidades na Terra pelas hidrotermais na reação do H_2 com o CO_2. Sendo assim, quando esse é encontrado sozinho em um espectro planetário, pode indicar uma origem abiótica, não sendo um indicativo da presença de vida; entretanto caso o CH_4 seja encontrado na presença de O_2, isso pode significar a presença de vida. (KALTENEGGER et al., 2008).

4.6. Extremófilos

4.6.1 O Domínio Archaea

Em 1990, utilizando comparações de sequências de 16S e 18S do rRNA (RNA ribossomal), Carl Woese e companheiros propuseram uma nova classificação universal para os seres vivos da Terra. Nessa nova classificação foi criado um novo nível taxonômico, o Domínio. Nesse contexto a vida no planeta Terra seria dividida em três domínios, *Archaea, Bacteria* e *Eucarya* (FAOR, 2006). Cada domínio é dividido em filos, sendo assim, o domínio *Archaea* é dividido atualmente, com base na sequência gênica do 16S do rRNA, em 4 filos filogeneticamente distintos: *Euryarchaeota, Crenarchaeota, Korarchaeota* e *Nanoarchaeota* (Figura 4).

Figura 4 - Árvore filogenética do gene 16S rRNA de *Archaea* com os genomas representado os 4 grupos de *Archaea (Euryarchaeota, Crenarchaeota, Korarchaeota e Nanoarchaeota*).

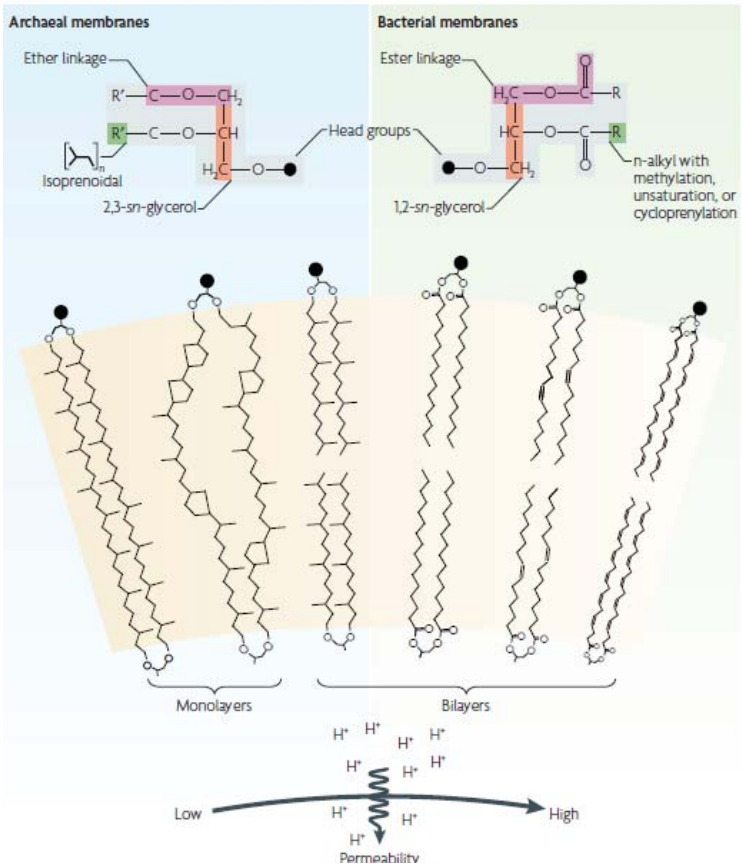


Fonte: Alquéres, et al. (2007).

Archaea compõe um domínio com seres microbianos e procariontes, sendo encontrados em ecossistemas marinhos e terrestres em uma quantidade significativa em relação aos procariontes, por isso são considerados impactantes nos ciclos energéticos geral.

Esses micro-organismos estão presentes em ambientes de alta e baixa temperatura, pressão, acidez, salinidade; sendo também encontrados na lama anóxica dos pântanos, no fundo do oceano e em depósitos de petróleo no subsolo. Alguns são mesófilos e se encontram em lugares mais amenos como no plâncton marinho, no esgoto e no solo; os *Archaea* metanogênicos são encontrados no trato digestivo de animais ruminantes, cupins e humanos.

Figura 5 - Membrana de *Archaea* e de *Bacteria* - A seta indica o aumento da permeabilidade a íons como prótons. A membrana de *Eukarya* é similar a das bactérias.



Fonte: Valentine (2007).

O domínio *Archaea* difere de *Bacteria* por algumas diferenças no tRNA (RNA transportador) e rRNA (RNA ribossomal), na membrana citoplasmática e na composição da parede celular, além da sua restrição a habitats não usuais. No geral os *Archaea* apresentam uma única parede celular contendo um peptidioglicano diferente das bactérias (VALENTINE, 2007). A membrana é formada de lipídios com álcool isoprenoidal de composto e éter ligado a glicerol enquanto que nos outros domínios (*Bacteria* e *Eukarya*), os lipídios são compostos de ácidos graxos esterificados ligados a uma porção de glicerol (Figura 5). A membrana dos *Archaea* é menos permeável a íons que a parede das *Bacteria*, sendo isso vantajoso para uma

menor perda energética durante a manutenção do potencial quimio-osmótico. Acredita-se que essa diferença é uma adaptação a ambientes inóspitos (VALENTINE, 2007).

Esses seres peculiares apresentam flagelos que notavelmente diferem em composição e desenvolvimento dos flagelos das bactérias e dos outros domínios. As células individuais dos *Archaea* variam de 0.1 a mais de 15 μm de diâmetro, e em algumas formas filamentosas e agregadas, alcançam até 200 μm de comprimento. Tais organismos apresentam-se em várias formas como esférica, espiral, lobadas, em forma de bastão, retangular, possuindo também uma grande variação no tipo de metabolismo.

Há muitas diferenças metabólicas entre os domínios, apesar disso, os genes metabólicos das *Bacteria* e dos *Archaea* compartilham um aspecto evolucionário comum. Entretanto, os maquinários que realizam a transcrição e translação dos *Archaea* são muito mais similares aos *Eucarya* do que de *Bacteria*. Por exemplo, a translação dos *Archaea* usa os mesmos fatores de iniciação e elongação que os eucariontes, e a sua transcrição envolve a proteína TATA-binding e TFIIB. Os *Archaea* e os eucariontes apresentam outras características semelhantes, como os aparelhos de replicação de DNA, em que as primases, helicases e polimerases replicativas, compartilhadas por *Archaea* e eucariontes, não são relacionadas com as das *Bacteria* (OLSEN & WOESE, 1996).

Quando analisamos o grupo *Archaea* junto a *Eukarya* e *Bacteria* pode-se constatar, primeiramente, que a complexidade do sistema molecular de *Archaea* é intermediária aos outros dois grupos, isto é, encontramos um número de componentes mediano entre os demais grupos. Como exemplo, as proteínas ribossomais dos *Archaea* são compartilhadas unicamente com *Eukarya*, enquanto que o domínio *Bacteria* não apresenta nenhum compartilhamento exclusivo de proteínas, seja com *Archaea*, seja com *Eukarya* (LECOMPTE et al. 2002). O mesmo se repete em outros sistemas moleculares relacionados aos processos informacionais, tais como a transcrição, a segmentação de proteína co-traducional e o metabolismo de RNA.

No que se refere ao compartilhamento de *Bacteria* com *Archaea* observa-se o tamanho e organização dos cromossomos, a presença de unidades de transcrição policistrônica de mRNAs e a inibição da translação pelo uso da sequência de Shine-Dalgarno (LONDEI, 2005).

Nesse contexto, podemos entender que os três domínios apresentam semelhanças e diferenças muito marcantes, em que processos informacionais encontrados nos *Archaea* são mais semelhantes a *Eukaria* do que a *Bacteria* (GRIBALDO, 2006). Essas diferenças encontradas entre os domínios *Archaea* e *Bacteria* devem derivar de adaptações genéticas e bioquímicas. Além disso, estes devem ser presumivelmente traços de longa data em uma perspectiva evolutiva (VALENTINE, 2007).

Assim, podemos entender que os *Archaea* apresentam proteínas parecidas com as dos Eucariontes em um contexto semelhante às bactérias (GRIBALDO, 2006). Apesar disso os *Archaea* apresentam características únicas, como a composição dos lipídeos da membrana celular (mostrado acima).

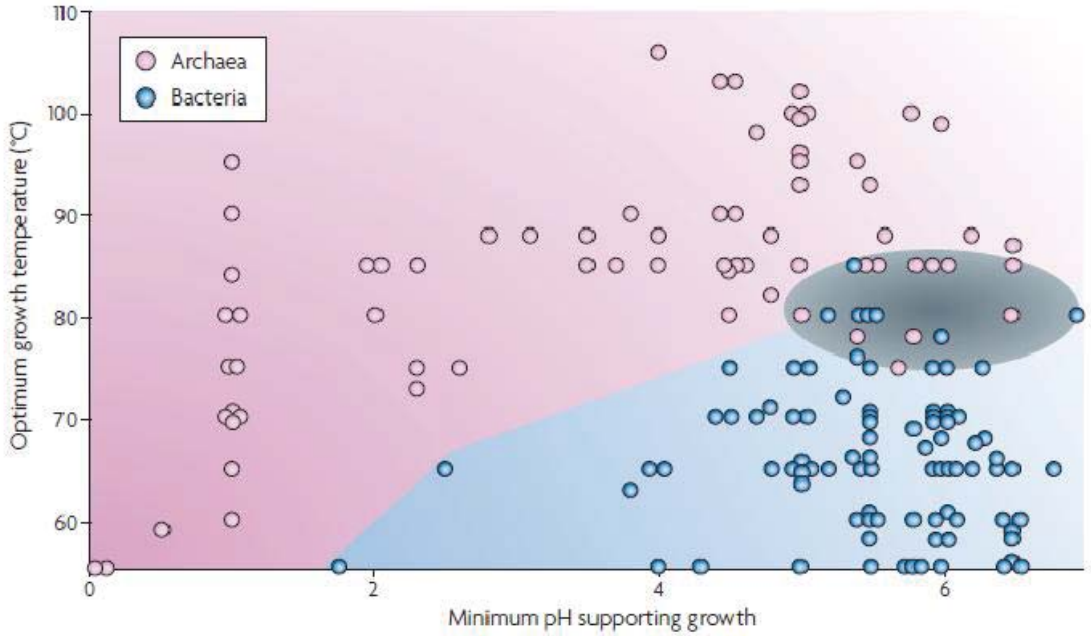
Segundo Valentine em 2007, os *Archaeas* apresentam essas características atípicas devido a uma adaptação ao estresse crônico energético. Essa adaptação é o fator principal de diferenciação ecológica de *Archaea* para com *Bacteria*. Pequenas quantidades de energia metabolicamente útil são conservadas pelos *Archaea* durante o catabolismo e isso permite que estes sobrevivam em ambientes com grande estresse energético, como é o caso de ambientes anaeróbicos. Consequentemente *Archaea* apresenta um distinto mecanismo de conservação de energia como, por exemplo, a metanogênese, a anaerobiose, a oxidação de metano, a redução de prótons, o acoplamento direto a translocação de prótons, a redução de enxofre e a fototrofia (VALENTINE, 2007).

Outra característica marcante nos *Archaea* é a presença de enzimas antioxidantes (extremozimas) que são uma poderosa ferramenta para os organismos extremófilos, já que estas conseguem resistir a condições atípicas. Essas enzimas permitem a detoxificação de radicais livres, o que pode favorecer a sobrevivência de micro-organismos aeróbicos em ambientes extremos.

Alguns *Archaea* apresentam capacidades únicas, como a metanogênese e a sobrevivência em ambientes com temperaturas elevadíssimas, por exemplo, a 90ºC (Figura 6). Esses indivíduos passíveis de viver em ambientes extremos (como em alta temperatura) e que conseguem se proliferar são chamados de extremófilos. (VALENTINE, 2007).

Diferentes modelos foram criados para tentar entender a relação filogenética dos domínios. Vários autores (GOGARTEN et al., 1989; IWABE et al., 1989; BROWN & DOOLITTLE, 1995; LAWSON et al., 1996; GRIBALDO & CAMMARANO, 1998) propuseram um modelo onde as bactérias eram descendentes diretos do LUCA (último ancestral universalmente comum), e *Archaea* e *Eukarya* seriam derivados de um ancestral posterior ao LUCA. Nesse caso *Bacteria* derivaria de um ramo da árvore filogenética separado, enquanto *Archaea* e *Eukarya* seriam linhagens irmãs.

Figura 6 – Temperatura ótima de crescimento (Optimun growth temperature) (ºC) e pH mínimo suportado para que haja crescimento (Minimum pH supporting growth) requeridos para o crescimento, distinguindo bactérias termofílicas e *Archaea.*

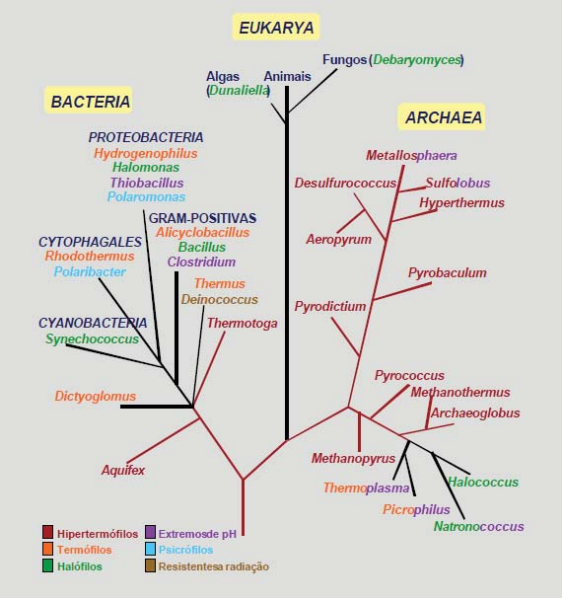


Fonte: Valentine (2007).

Essa relação filogenética entre *Archaea* e *Eukarya* pode ser a razão pela qual os mecanismos informacionais destes são tão similares, sendo que estas características teriam sido originadas na linhagem precursora do ancestral comum deles, enquanto que as bactérias homólogas apresentam traços ancestrais. Isso convém com a ideia de que células eucariontes são mais complexas e derivadas que as células procariontes.

Entretanto, também é possível criar um cenário em que *Archaea* e *Eukarya* retiveram características ancestrais, enquanto *Bacteria* seria derivada. Apesar desses modelos, nenhuma comprovação pode ser feita, já que os três domínios podem ser derivados e nenhum pode ser vinculado diretamente ao LUCA. Outros modelos foram criados para tentar explicar a relação entre *Archaea, Eucarya e Bacteria*, sendo um desses modelos caracterizado por ter o domínio *Bacteria* como sendo origem para os outros domínios (*Archaea e Eucarya*), nesse caso *Archaea e Eucarya* seriam bactérias modificadas, como mostrado na figura 7 (GRIBALDO, 2006).

Figura 7 - Árvore filogenética segundo Woese *et al*., 1990, com localização de extremófilos. O tipo de extremofilia está identificado com o código de cores indicado.



Fonte: Santos et al. (2001).

4.6.2 Extremófilos e seus habitats

MacElroy em 1974 foi o primeiro a utilizar o termo "extremófilo", para designar organismos que se proliferam em ambientes extremos (SANTOS et al., 2001). Não há uma definição geral do que seria um ambiente extremo, o que dificulta a definição dos extremófilos, contudo, podemos dizer que os extremófilos são organismos que podem se proliferar e se desenvolver em ambientes que usualmente seriam letais para a maioria dos organismos, podendo não sobreviver em ambientes que a maioria dos seres vivos comumente suportaria.

Os ditos "ambientes extremos" podem apresentar temperaturas elevadas ou reduzidas, acidez muito reduzida ou muito elevada, alta salinidade, alta radiação, alta pressão e outras situações onde há poucos seres vivendo. Tem se como ambientes extremos os seguintes: Sistemas hidrotermais submarinos; sistemas lagunares hipersalinos e alcalinos; sistemas de vales e gelo do antártico; e ambientes extraterrestres. São exemplos de ambientes extremos as chaminés de vulcões Stromboli, o deserto gelado do pólo norte, o Great Artesin Basin, Krisuvik, Hveragerthi, Kerlingafjöll (Islândia), Yellowstone National Park (EUA), White

Islan (Nova Zelândia), Península Kamchatka (Rússia), Hokkaido (Japão) e Pisciarelli Solfatara, Naples (Itália) (HUBER et al. 2002).

Geralmente os ambientes extremos mais conhecidos são aqueles que apresentam alta temperatura. Na superfície terrestre encontramos ambientes chamados de "hot springs" (como Yellowstone) que possuem pH neutro ou ácido e sulfuroso ou rico em ferro. As áreas quentes do subterrâneo terrestre são diversas e vão desde áreas termais vulcânicas terrestres (STETTER, 1999; ROTHSCHILD E MANCINELLI, 2001), que apresentam baixa salinidade (0,1 - 0,5% NaCL), pH variando de 0,5 a 9,0 e temperatura variando de 80 a 100ºC dependendo da altitude, até ambientes que são aquecidos em virtude da sua profundidade. Nesse caso, os organismos que conseguem sobreviver a esses ambientes extremos apresentam um metabolismo muito variado. Eles podem ser termófilos, acidófilos, alcalífilos, endólitos, halófilos, psicófilos, hipertermófilos, radiófilos, xerófilos (Tabela 2).

Tabela 2 – Tipos de extremófilos

Tipo	**Características**
Hipertermófilo	Crescimento > 80ºC
Termófilo	Crescimento 60-80ºC
Psicrofilo	Crescimento < 15ºC
Atomófilos	> 6000 rad/hr;
Barófilos	Acima de gigapascal
Xerófilos	Ausência quase completa de H_2O
Halófilos	2-5 NaCl
Alcalófilos	pH > 9
Acidófilos	pH < 0
Anaeróbio	Não tolera O_2
Microaerófico	Tolera baixas [O_2]
Gases	Atmosfera pura de CO_2
Metais	Elevada concentração de metais

Fonte: www.ucm.es/info/btg/personales/jvsgago/termof.pdf.

A extremofilia não constitui uma característica filogenética (SANTOS, 2001), apesar de, na maioria das vezes, os extremófilos pertencerem ao domínio *Archaea*. Alguns extremófilos podem ser encontrados nos outros domínios (*Bacteria e Eucarya*), no entanto a

maioria dos extremófilos mais resistentes pertencem ao domínio *Archeae.* Por exemplo, os hipertermófilos, organismos que conseguem resistir a temperaturas extremamente elevadas (superior a 100ºC) pertencem ao domínio *Archeae* (SANTOS et al., 2001).

A tabela abaixo mostra alguns exemplos de extremófilos tanto pertencentes ao domínio *Archeae* quanto *Bacteria.*

Tabela 3 - Tipos de extremofilia.

Grupo	**Organismo**	**Limite de crescimento**
Termófilo	*Pyrolobus fumarii*	113ºC
Psicrófilo	*Himalayan Midge*	-18ºC
Acidófilo	*Ferroplasma acidarmanus*	pH 0
Alcalófilo	*Alkaliphilus transvaalensis*	pH 12.5
Barófilo	*Moriella spp.*	80MPa

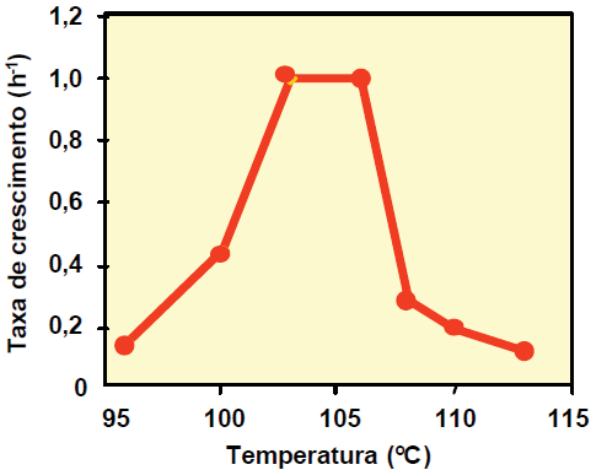
Fonte: Hendry (2006).

4.6.3 Termófilos e suas características

Os extremófilos resistentes a altas temperaturas podem ser encontrados em locais com temperaturas acima de 45ºC, podendo ser termófilos (resistentes a temperaturas acima de 50ºC) ou hipertermófilos (resistentes a temperaturas acima de 80ºC). Os organismos termófilos, de modo geral, apresentam proteínas que usualmente exibem mais estabilidade térmica e versatilidade do que os organismos mesófilos.

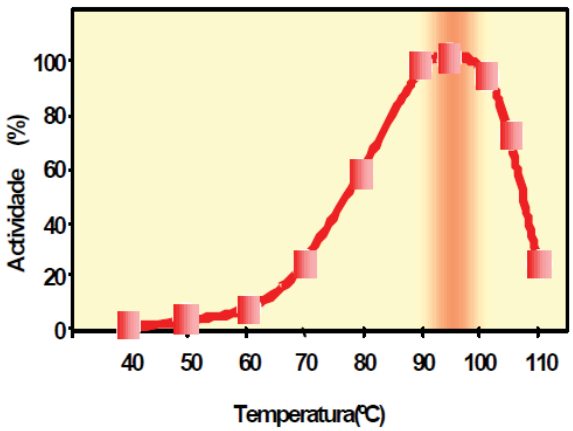
Os organismos hipertermófilos, encontrados pela primeira vez por Karl O. Stetter, são conhecidos por metabolizar elementos como enxofre e por serem metanogênicos. Geralmente os organismos que conseguem crescer em temperaturas entre 103ºC e 110°C são membros do gênero *Pyrobaculum, Pyrodictium, Pyrococcus, Methanopyrus* (STETTER, 1996) enquanto que os organismos que conseguem resistir a temperaturas entre 106ºC e 115ºC são membros do gênero *Pyrolobus* (SANTOS et al., 2001) (Figura 8 e 9).

Figura 8 - Perfil de crescimento (h^{-1})do hipertermófilo *Pyrolobus fumarii* em função da temperatura (ºC). Nota-se que o organismo não cresce abaixo de 95 ºC.



Fonte: Blöchl et al. (1997).

Figura 9 - Perfil de atividade (%) de uma enzima intracelular de *Pyrococcus horikoshii* (sintetase do manosilfosfoglicerato) em função da temperatura (ºC). A enzima apresenta atividade máxima entre 90ºC e 100ºC.



Fonte: Empadinhas et al. (2001).

O entendimento de como os componentes celulares, principalmente as proteínas, conseguem ficar estáveis para manter um organismo vivo é até hoje um enigma. O que se

sabe atualmente foi graças à comparação das proteínas com diferentes graus de estabilidade térmica, sugerindo que a estabilização envolve vários níveis de hierarquia da estrutura de proteínas, nomeadamente secundária, supersecundária, terciária e quaternária (JAENICKE & BÖHM, 1998).

Apesar dessa expectativa pouca animadora e a despeito de exemplos frustrantes, a substituição pontual de resíduos em enzimas tem tido tentativas bem sucedidas, as quais obtiveram notáveis incrementos na estabilidade térmica e na atividade catalítica (ARNOLD et al., 1999; GIORDANO et al.,1999). No entanto tais estudos mostram que a eficiência das enzimas dos hipertermófilos é reduzida, ou muito semelhante das enzimas dos mesófilos ou dos psicrófilos, com exceção da maior rigidez destas nos hipertermófilos. Tal rigidez se faz necessária para a estabilidade térmica, assim como a flexibilidade que é exigida para a atividade catalítica, e ambas juntas resultam em um estado funcional otimizado semelhante ao das enzimas dos mesófilos ante a temperatura ambiente (DANSON et al., 1996; GERDAY et al.,2000; LADENSTEIN & ANTRANIKIAN, 1998). Tais pontos ainda estão sobre questionamentos e recentes experimentos com *Pyrococcus furiosus* podem por a prova tais conclusões.

Frente aos vários experimentos com enzimas *in vitro* que apresentaram baixa estabilidade, iniciou-se uma reflexão sobre a possível presença de fatores extrínsecos que pudessem estabilizar as biomoléculas em altas temperaturas. Desse modo, recentemente, constatou-se que certos compostos orgânicos de baixa massa molecular, a exemplo do manosilglicerato, do fosfato de di-mio-inositol e do fosfato de diglicerol, estariam presentes somente em organismos termófilos e hipertermófilos. Além disso, testes *in vitro* demonstraram a capacidade termoestabilizadora destes compostos sobre uma variedade de proteínas (LAMOSA et al., 2000; RAMOS et al.,1997). Com isso, Santos e da Costa (2001) afirmam que tais compostos podem então ser uma das estratégias usadas pelos organismos hipertermófilos para evitar os danos causados à estrutura celular pelas altas temperaturas.

À medida que novos estudos são concluídos, vários fatores são aceitos e refutados como possíveis estratégias para a resistência as altas temperaturas. Bouthier de la Tour *et al.* (1990) descreveu uma das estratégias que ainda hoje são aceitas, a da presença exclusiva da girase reversa nos organismos hipertermófilos, enzima essa a qual teria a função de conferir estabilidade térmica adicional à dupla hélice do DNA.

Outra estratégia hoje aceita é a aerobiose, a qual anteriormente era tida como "inimiga" da hipertermofilia devido à baixa solubilidade do O_2 em altas temperaturas. Essa inimizade foi refutada por estudos realizados na década de 90 que mostraram a existência de organismos hipertermófilos aeróbios, sendo que isso ocorreria, possivelmente, devido ao aumento do coeficiente de difusão, concomitante a queda da solubilidade do O_2.

Uma das estratégias cruciais para a hipertermofilia seria a estabilização de coenzimas, sobretudo a do NAD+, muito instável a temperaturas próximas de 100ºC. Os estudos sobre tal estratégia ilustram que não necessariamente deveria se substituir o NAD+, aparentemente instável em hipertermófilos, mas se valer de outras saídas, tais como reciclagem rápida das coenzimas, direcionamento metabólico, fatores estabilizadores extrínsecos, ou elevada eficiência catalítica das enzimas relevantes.

4.7. Exoplanetas com Rotação Síncrona

4.7.1 CoRot-7 b

O planeta CoRoT-7 b é um planeta rochoso (LÉGER, 2011) que orbita uma estrela do tipo G9V (LÉGER et al. 2009, QUELOZ et al. 2009, HATZES et al. 2009), estrela essa com uma temperatura de 5250 ± 60 K (GUENTHER et al., 2010). Possui um raio de 1.58 ± 0.10 R_E[13], sendo o primeiro planeta descoberto a demonstrar um raio semelhante ao da Terra (SCHAEFER, 2011). Apresenta um semi-eixo maior de 0.0172 ± 0.00029 AU, uma densidade de 9.6 ± 2.7 g cm^{-3} (GUENTHER et al., 2010, HATZES et al. 2010) e um período orbital de 0,84 dias (CARONE et al., 2012). A sua massa é controvérsia, mas considerando Léger (2011) ela seria de 6,9 ± 1.2M_E[14]. A temperatura presente no lado escuro é resultado do aquecimento geotérmico[15], o qual para o CoRoT-7 b pode ser estimado de 0.5 ± 0.2 Wm^{-2} (LÉGER, 2011).

O balanço entre o fluxo e a emissão radioativa da superfície do lado não iluminado, resultaria em uma temperatura de superfície de ≈ 55 ± 5 K. Em resposta a deposição de material congelado na superfície do planeta no lado escuro, o albedo para esse lado do planeta deve ser bem elevado[16]. Assim considerando-se um albedo médio de A = 0.8 o lado escuro apresentaria uma temperatura de, em média, 50 a 75K (LÉGER, 2011).

---

[13] R_E – Raio da Terra

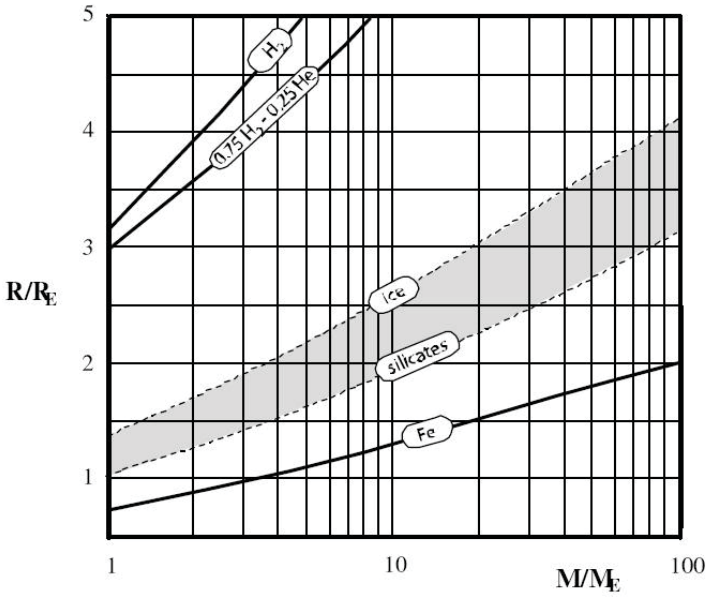
[14] M_E – Massa da Terra

[15] Cf. Seção 4.2 deste trabalho

[16] Cf. Seção 4.4 deste trabalho

A partir da massa e raio do planeta podemos estimar a sua composição, no entanto, devido as incertezas na massa e no raio do CoRoT-7 b, há uma grande dificuldade para essa identificação. Entretanto, Léger (2011) sugeriu, utilizando a figura abaixo proposta por Grasset, relacionando a massa com o raio do planeta, uma composição para o CoRoT-7 b.

Figura 10 - Raio dos planetas (R/R_E) com diferentes composições calculadas em função da sua massa (M/M_E).



Fonte: GRASSET et al. (2009).

Nessa figura foi proposta uma relação entre o raio e a massa dos planetas, assim com a variação da massa se observa uma variação na composição dos planetas em relação ao raio. (GRASSET et al., 2009). As linhas contínuas representam a composição do planeta dependendo do raio e da massa, nesse caso as linhas de [Fe], [silicates], [ices], [H_2–He] correspondem, respectivamente, a planetas, com Fe puro, silicatos e núcleo metálico, gelo puro e gás H_2-He. A região cinza corresponde a planetas compostos de sílica. Esse modelo não pode ser considerado definitivo, já que podem ocorrer variáveis em relação ao planeta.

Assim, utilizando essa figura, Léger (2011) determinou, a partir da massa e raio ($6,9 \pm 1.2 M_E$, $1.58 \pm 0.10\ R_E$), que CoRoT-7 b se encontrava abaixo da curva de sílica. Para explicar essa situação ele propôs que uma erosão muito eficiente resultou em uma perda de voláteis como H_2, He e H_2O. Isso ocorreria pelo fato do planeta estar muito próximo da estrela, sujeitando-se a um intenso fluxo extremo ultravioleta (EUV) e também a partículas de vento. Nesse caso, ainda estariam presentes na atmosfera apenas outros elementos que possuíssem

grandes reservatórios. Assim, a hipótese concluída por Léger é que o planeta CoRoT-7 b é rochoso com composição de uma "Terra seca".

Schaefer em 2011 propôs um modelo atmosférico para o CoRoT-7 b partindo da premissa que o planeta perdeu todos os seus elementos voláteis (H, C, N, S, etc.). Nesse modelo Schaefer utilizou duas composições planetárias já conhecidas, a BSE (Bulk Silicate Eart) e a Continental Crust (Crosta continental). O modelo teórico proposto por Schaefer inicialmente relaciona a temperatura com a variação do log da fração de moles (quantidade de mol do elemento dividido pela quantidade de mols do sistema) dos compostos presentes em BSE e na crosta continental e, posteriormente relaciona a temperatura com pressão (log em bar).

A BSE é um dos mantos primitivos da Terra, sendo empobrecido de voláteis, calcófilo e siderófilo (KARGEL, 1993). Os calcófilos são elementos geoquimicamente correlatos com as fases do manto e que tem maior afinidade com fases sulfetadas do que com fases silicáticas/litófilas e siderófilas, como por exemplo, o Cu, S, Se, As, Pb, Zn, Cd, Ag. Já os siderófilos são os elementos químicos que, quando em fases metálicas, tem afinidade geoquímica com o ferro, tais como o Ni, Co, P, C, Pt e Au, os quais são comuns no núcleo terrestre e em meteoritos sideríticos (WINGE et al., 2001). A BSE foi formada por meio da combinação dos efeitos da formação do núcleo e a volatilidade. Inclui-se ainda na formação da BSE a condensação e sublimação da nebulosa solar, a perda volátil durante a acreção, e o inicio da evolução da Terra. A crosta continental é a camada de rocha que forma os continentes e as plataformas continentais (GAO, 2010). A tabela 4 mostra a composição em volume dos elementos presentes tanto na BSE quanto na crosta continental.

Tabela 4 - Composição em volume (%) dos elementos presentes na crosta continental e na BSE. O total é menor que 100% por que o Ni não é considerado.

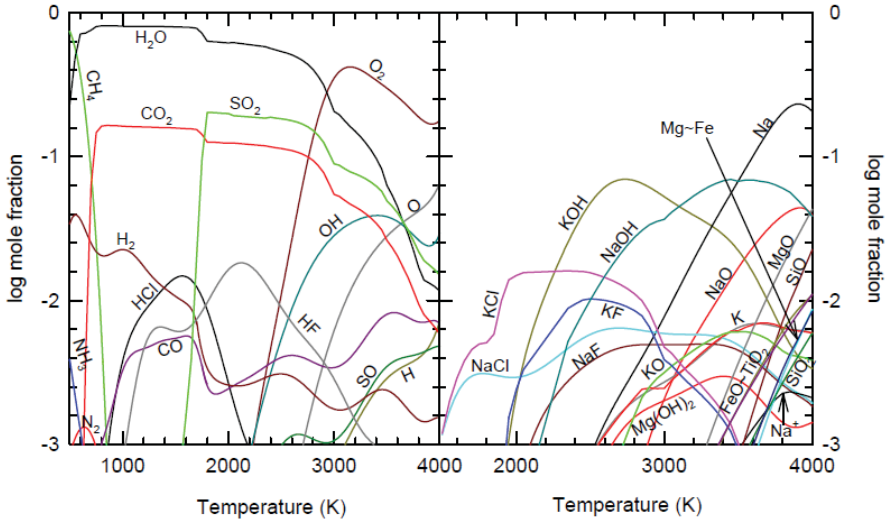
Element	Continental Crust[1] (wt%)	Bulk Silicate Earth[2] (wt%)
O	47.20	44.42
Si	28.80	21.61
Al	7.96	2.12
Fe	4.32	6.27
Ca	3.85	2.46
Na	2.36	0.29
Mg	2.20	22.01
K	2.14	0.02
Ti	0.401	0.12
P	0.076	0.008
Cr	0.013	0.29
Mn	0.072	0.11
H	0.045	0.006
C	0.199	0.006
N	0.006	0.88×10^{-4}
S	0.070	0.027
F	0.053	0.002
Cl	0.047	0.004
TOTAL[3]	99.822	99.776

[1]Wedepohl (1995). [2] Kargel & Lewis (1993) [3]Totals are less than 100% because Ni is not considered.

Fonte: Schaefer et al. (2011).

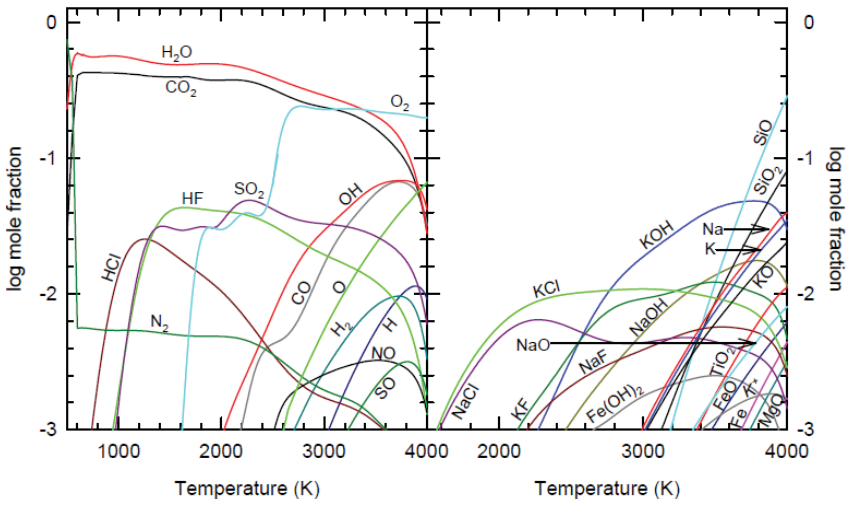
As figuras 11 e 12 mostram a relação da fração molar em log, com a temperatura em relação às duas composições planetárias. Com essas figuras podemos analisar a quantidade de elementos presentes na atmosfera com a temperatura da superfície de um planeta.

Figura 11 – Composição de BSE relacionando o log em fração de mole com a temperatura (K).



Fonte: Schaefer et al. (2011).

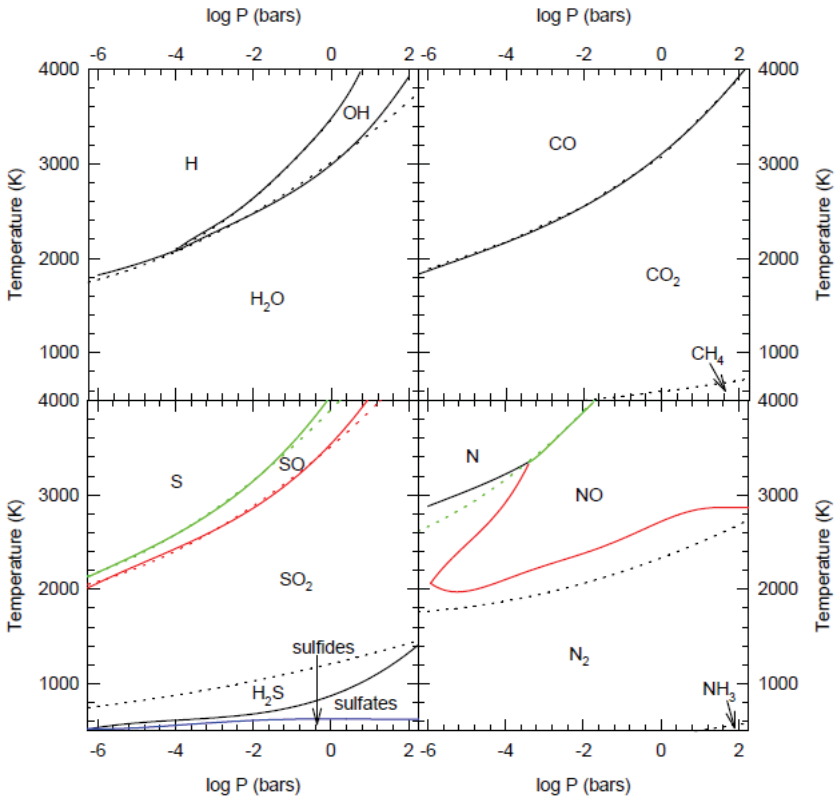
Figura 12 – Composição de crosta continental relacionando o log em fração de mole com a temperatura (K).



Fonte: Schaefer et al. (2011).

Como analisado anteriormente a temperatura do CoRoT-7 b, considerando transporte de calor, é de 1821K e desconsiderando-se o transporte de calor, é de 2575K. Nesse caso, levando se em conta a BSE e estando em uma temperatura maior que 1900K, os principais compostos presentes na atmosfera seriam H_2O, SO_2, CO_2, ordenados pela abundância. Já para uma temperatura menor que 1900K, ainda considerando a BSE, os compostos seriam H_2O, CO_2, SO_2, ordenados pela abundância (Figura 11). Já sob o âmbito da crosta continental, para uma temperatura acima de 1800K, ordenados pela abundância, temos H_2O, CO_2, SO_2 (Figura 12).

Figura 13 - Gases principais H, C, S, N relacionando pressão (bars) e temperatura (K).



Fonte: Schaefer et al. (2011).

A figura 13 está relacionando a temperatura com o log da pressão (bars). Com essa figura podemos verificar quais elementos (relacionando a pressão e a temperatura) se dissociam e quais elementos permanecem ligados. Assim, vemos que em uma temperatura maior que 1800K a H_2O se dissocia estando presente na forma de H e OH. Já para o CO_2 em uma temperatura superior que 1800K esse se dissocia em CO. Quanto ao SO_2, em uma

temperatura menor que 2000K, ele permanece na sua forma associada, já para uma temperatura acima de 2000K, o SO_2 se dissocia em S e SO.

Assim, considerando que haja transporte de calor o CoRoT-7 b apresentaria na sua atmosfera, principalmente, os elementos dissociados H e OH, CO e SO_2. Caso não haja transporte de calor, a atmosfera do CoRot-7 b seria composta principalmente por H, OH, CO, S e SO.

Essa composição indica que o CoRoT-7 b não apresenta H_2O (gasosa) em sua atmosfera, porque a H_2O é dissociada e o H é liberado para o espaço. Isso indica que o planeta não apresenta H_2O (líquida) na sua superfície, o que pode dificultar a existência de organismos vivos. Entretanto, como será discutido posteriormente, seres quimiolitotróficos podem existir abaixo da superfície, onde H_2O líquida pode existir devido a diminuição da temperatura.

4.7.2 Kepler-11 f e Kepler-9 d

O planeta Kepler-11 f orbita uma estrela do tipo G, estrela esta que possui uma temperatura de 5680 ± 100K (exoplanet.eu). Esse planeta apresenta um raio de 2.61053 R_E, uma massa de 2.30013571 M_E, um semi-eixo maior de 0.25 ± 0.009 AU (exoplanet.eu), uma densidade de 0.7g cm^{-3} (kepler.nasa.gov) e um período orbital de 46.68876 (± 0.00074) dias (exoplanet.eu).

O planeta Kepler-9 d orbita uma estrela com 1 M_{sun}, tendo uma temperatura de 5722K (exoplanet.eu). Apresenta um raio de 1.64 R_E (kepler.nasa.gov), uma massa de 6.99 M_E, um semi-eixo maior de 0.0273, um período orbital de 1.5928 dias (exoplanet.eu 2012).

As atmosferas dos planetas Kepler foram analisadas por Miguel et al. (2010). Para isso, utilizou-se o MAGMA code, o qual calculou o equilíbrio entre o derretimento e o vapor de um magma exposto a temperaturas mais altas que 1000K para os elementos Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, O, Si, Ti e seus compostos. Partindo da premissa que a composição da crosta dos planetas Keplers é similar à composição da Komatiite, ele explorou a pressão parcial de todos os gases vaporizados em diferentes temperaturas.

Komatiite são rochas ultramáficas, isto é, rochas magmáticas contendo menos de 45% de sílica, ausência de quartzo, ricas em magnésio, ferro e cálcio. Estas rochas estão presentes

na era Archaean (NESBITT, 1979), tendo origem mantélica. A tabela 5 abaixo mostra a sua composição:

Tabela 5 – Composição da Komatiite e do BSE utilizada para o Magma

Oxide	SiO_2	MgO	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	FeO	CaO	Na_2O	K_2O
Komatiite (Wt. oxide %)	47.10	29.60	4.04	0.24	12.80	0.0	5.44	0.46	0.09
Bulk silicate Earth (Wt. oxide %)	45.97	36.66	4.77	0.18	0.0	8.24	3.78	0.35	0.04

Fonte: Miguel et al. (2010).

Foi calculado a coluna de densidade de cada gás como função da pressão parcial para massas planetárias entre 1 e 10 M_E, correspondendo a raios entre 1 e 2.5 R_E.

$$\sigma_i = P_i N_A / g \mu_i$$

N_A - número de Avogadro
μ_i - peso molecular das espécies
g - aceleração gravitacional da superfície de cada planeta.

Relacionando a fórmula previamente explicada (tópico 3.2) que propunha uma temperatura de equilíbrio para os planetas e a fórmula acima foi possível propor uma conexão entre a pressão parcial e a atmosfera.

Nesse caso, as variáveis mais importantes para se delimitar a composição de uma atmosfera são a temperatura de superfície e a distância da estrela mãe; as massas planetárias não influenciaram no tipo de atmosfera,. Miguel baseou-se em uma atmosfera livre de gases voláteis (H, C, N e S) seguindo o exemplo de Schaefer e Fegley (2009).

Assim foram propostas cinco atmosferas possíveis para os Keplers:

- Atmosfera I (T_p[17]< 2033) – presença de Na, O_2, O e Fe, em ordem de abundância.
- Atmosfera II ($2033K<T_p<2588K$) – presença de Na, O_2, O, SiO, Fe e Mg, em ordem de abundância.
- Atmosfera III ($2588K<T_p<2890K$) – Na, O_2, O SiO, Mg e Fe, em ordem de abundância.
- Atmosfera IV ($2890K<T_p<2168K$) – Na, SiO muito abundantes.
- Atmosfera V ($T_p>3168K$) SiO, O, O_2 e Na, em ordem de abundância.

Considerando os dois planetas Keplers analisados por esse trabalho, Kepler-11 f e Kepler-9 d, podemos, com esses dados, propor uma atmosfera possível.

Para o Kepler-11 f temos uma temperatura de 573K, considerando que haja transporte de calor, e de 810K, considerando que não haja transporte de calor. Nesse caso, o Kepler-11 f se enquadra na Atmosfera I proposta por Miguel ($T_p< 2033$) e assim, nesse planeta, observaremos uma atmosfera com a presença de Na, O_2, O e Fe (em ordem de abundância).

Já para o Kepler-9 d temos uma temperatura de 1747K, considerando que haja transporte de calor e de 2471K considerando que não há transporte de calor. Deste modo, Kleper-9 d se enquadra em duas atmosferas propostas por Miguel, tanto a Atmosfera I quanto a II. Considerando que o planeta tenha uma temperatura de 1747K, isto é, que apresente transporte de calor pela sua superfície, podemos considerar que esse planeta possui uma Atmosfera do tipo I ($T_p< 2033$), estando presentes os elementos Na, O_2, O e Fe, em ordem de abundância. Caso não exista transporte de calor na superfície, podemos considerar que a atmosfera desse planeta será do tipo II ($2033K<T_p<2588K$), estando presente os elementos Na, O_2, O, SiO, Fe e Mg, em ordem de abundância.

4.7.3 Gliese 581 g

Existe uma grande discussão em relação aos planetas que orbitam estrelas do tipo M. Esses planetas geralmente se encontram muito próximos da sua estrela, podendo acarretar alguns problemas para a habitabilidade. Em compensação, as estrelas do tipo M, por serem longevas, apresentam uma zona habitável contínua que permanece por uma distância muito mais longa do que uma zona habitável contínua ao redor de uma estrela do tipo G. Simulações

[17] T_p – Temperatura de equilíbrio

numéricas apontam que é mais provável que planetas se formem em zonas habitáveis de estrelas anões M (WETHERILL, 1996), porém apesar disso, as buscas por planetas habitáveis geralmente ocorrem com planetas orbitando estrelas do tipo G (iguais ao Sol). Joshi, em 2003, fez uma análise em relação a essa discussão dando ênfase na relevância da procura por planetas que orbitam estrelas do tipo M.

Conforme Kasting (1993) existem três razões para considerar não vantajosa, a busca por um planeta orbitando uma estrela do tipo M. Primeiro um planeta circulando uma estrela do tipo M apresentaria uma órbita tão pequena que se tornaria síncrona, nesse caso o lado escuro estaria constantemente privado de luz da estrela, o que atuaria como um dissipador de atmosfera, tornando o planeta inabitável. Em segundo, as estrelas do tipo M, especialmente quando novas, são conhecidas por apresentarem diferentes "atividades de chama", o que acometeria o planeta com fortes ondas de radiação. A terceira razão é que as estrelas do tipo M são conhecidas por terem uma grande variação da luminosidade, atingindo até 40%, isso ocorre devido às manchas solares que podem durar alguns meses.

Haberle (1994), e Joshi (1997), propuseram modelos que contradiziam as afirmações de Kasting (1993). Primeiro, conforme proposto por Haberle, um modelo simples unidimensional de balanço energético mostra que uma atmosfera com mais de ≈ 0.1 bar de CO_2 poderia ser estável, enquanto que o transporte de calor atmosférico do lado iluminado iria compensar o esfriamento radiativo do lado escuro. Joshi (1997) encontrou o mesmo resultado utilizando um modelo de circulação geral simplificado, usando-o para explicar as condições para a habitabilidade em diferentes cenários. Em segundo lugar, Heath (1999), afirmou que as "atividades de chama", com um fluxo de radiação UV-A (200nm), que atingem um planeta na zona habitável de uma estrela do tipo M são muito similares (em magnitude) a radiação que a Terra recebe continuamente. Sendo assim, conclui-se que essa "atividade de chama" não é um fator importante para desconsiderar a busca por planetas habitáveis ao redor de estrelas do tipo M. E como terceiro ponto, Joshi (1997), descobriu que essas manchas solares extremas só iriam causar um colapso na atmosfera se o planeta estivesse na mais fria "condensação de CO_2" da extremidade da HZ. Entendemos assim que a questão é por deveras contraditória e incerta.

O planeta Gl 581g orbita uma estrela do tipo M3V que apresenta uma temperatura de 3480 K (BEAN et al. 2006) e uma idade de 7Gyr (SCHMITT et al. 1995; VOGES et al. 2000). O planeta apresenta um raio de 1.41 R_E, uma massa que varia de 3.1 até 4.3 M_E (BLOH et al., 2011), um período orbital de 36.5 dias (VOGT et al., 2012), um semi-eixo

maior de 0.14601±0.00014AU e excentricidade próxima de 0 (BLOH et al., 2011). A existência desse planeta ainda é controvérsia.

Pierrehumbert (2011) propôs diversos modelos para criar um ambiente para o planeta Gliese 581 g. O modelo chamado de "Uma superfície rochosa sem ar" (Airless with Rocky Surface) foi considerado pelo autor como o estado mais fácil de ser encontrado, apesar de considerar essa hipótese desapontadora. Nesse modelo Gliese 581 g seria um planeta rochoso sem atmosfera e apresentaria uma rotação síncrona, o que significa que o lado noturno não seria iluminado pela radiação da estrela. A temperatura seria de 332K no lado iluminado, sendo o lado escuro aquecido apenas pela condução de calor do interior para a superfície. Nesse caso a temperatura do lado escuro seria de 100K (PIERREHUMBERT, 2011).

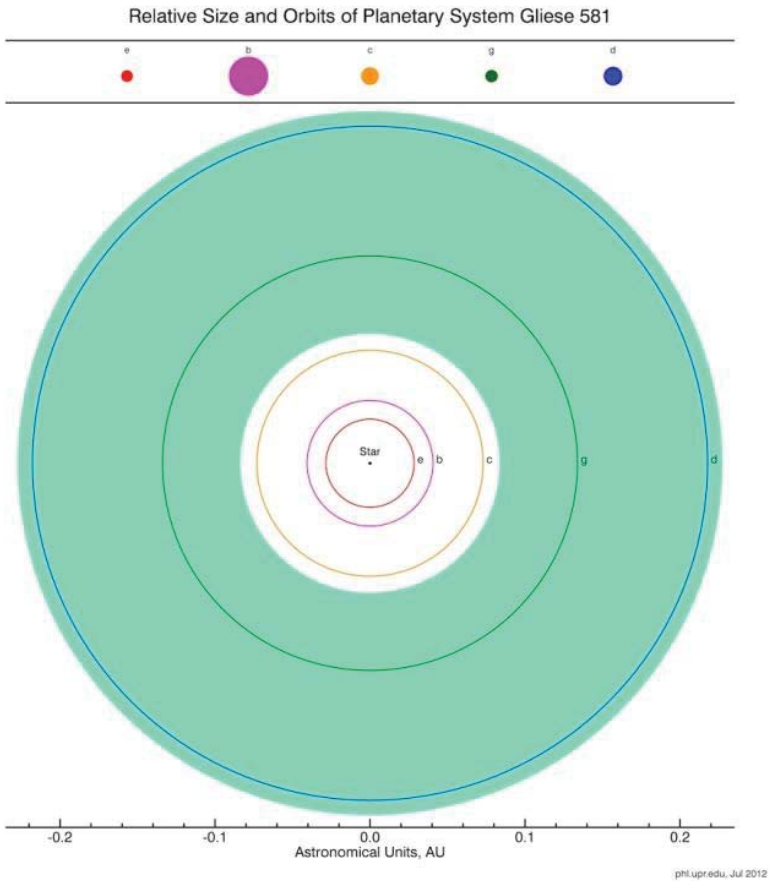
Outro estudo foi realizado com Gliese 581 g em 2011 por Bloh para determinar a sua habitabilidade. Bloh et al. (2011) tinha como objetivo da pesquisa verificar se o planeta poderia ser habitável. Para isso eles utilizaram a definição de Valencia (2006), que propôs que as Super Terras são planetas rochosos que apresentam uma massa entre 1 a 10 M_E e são quimicamente semelhante à Terra. Para verificar a habitabilidade do planeta Gl-581 g, Bloh e colegas analisaram se esse se encontrava na HZ[18].

Os autores utilizaram como parâmetro para a habitabilidade a pHZ (zona habitável fotossintética). A pHZ considera uma habitabilidade ligada a atividade fotossintética do planeta, que depende da concentração atmosférica de CO_2 e a presença de água no estado liquido, sendo então fortemente influenciada pela dinâmica planetária. Esse conceito limita espacialmente e temporalmente a habitabilidade, já que a pHZ torna-se mais restrita com o tempo, devido a diminuição constante da concentração atmosférica planetária de CO_2. Blot considerou uma massa de $3.1M_E$ ou $4.3\ M_E$ e uma distância orbital de 0.146AU para o planeta Gl-581 g, uma idade de 7Gys e luminosidade $0.013L_{sun}$ para a estrela. Utilizando esse parâmetro, Blot propôs que Gl-581 g está na pHZ, considerando as duas massas e estaria em uma posição próxima da HZ (receberia a mesma luminosidade) comparada com a Terra se esta fosse iluminada por uma estrela do tipo M. Então desse modo, caso seja comprovado a sua existência, esse será um dos principais exoplanetas de interesse astrobiológico.

A figura 14 abaixo mostra o sistema Gliese 581 ilustrando o tamanho estimado da órbita para os cinco planetas que o orbitam.

[18] Cf. Seção 3.1 deste trabalho. HZ

Figura 14 - Tamanho e órbita relativa do sistema planetário Gliese 581



Fonte: phl.upr.edu./press-releases/fivepotentialhabitableexoplanetsnow.

A região verde representa o tamanho da Zona habitável, isto é, a região orbital onde os planetas iguais a Terra poderiam ter uma superfície de água líquida. Os planetas Gliese 581 e, Gliese 581 b e Gliese 581 c estão muito próximos da estrela e por isso são muito quentes, não sendo possível a presença de água líquida (considerando apenas a distância da estrela). Já os planetas Gliese 581 d e Gliese 581 g estão na HZ enfatiza-se que o Gliese 581 g esta em uma posição muito propícia para ser um planeta semelhante à Terra. Esse é o primeiro sistema estelar que apresenta dois exoplanetas potencialmente habitáveis orbitando a mesma estrela (http://phl.upr.edu.).

4.7.4 Gliese 876 d

O planeta Gliese 876 d orbita uma estrela do tipo M4V, que apresenta uma temperatura de 3350 ± 300 K e uma massa de 0.334 M_{sun} (exoplanet.eu, 2012). O planeta tem uma massa de 6.67 M_E, um semi-eixo maior de 0.02 e um período orbital de 1.9378 (exoplanet.eu, 2012).

Grasset et al. (2009) realizou um trabalho com o objetivo de descrever como a quantidade de água presente na superfície do planeta pode ser avaliada a partir de medições M-R (relação massa e raio). É possível caracterizar a composição das Super Terras por meio de medições M-R, isto é, a relação M-R proposta por Grasset et al. (2009) permite caracterizar a composição principal de núcleos sólidos de exoplanetas, contanto que o raio e a massa sejam conhecidos e a contribuição da atmosfera possa ser removida.

Existem quatro classes de planetas que separam as famílias das Super-Terras. Essas classes são: rico em ferro, rico em silicato, rico em água e com atmosfera espessa (GRASSET et al., 2007).

O raio de um planeta pode mudar significativamente (para uma dada massa) de um planeta rico em ferro para um planeta rico em atmosfera, por exemplo: a transição de um planeta (esgotado) rico em silicato para um planeta gelado, induz um aumento do raio entre 30% (100Me) e 40% (1ME). Assim, a relação M-R pode ser suficientemente precisa para determinar a descoberta de um planeta semelhante à Terra.

Com esse trabalho Grasset propôs a figura $10^{(19)}$ que utiliza a relação M-R relacionando com a composição do planeta.

Léger (2011), analisou a figura 10 e propôs que o planeta CoRot-7 b estava na região da figura a qual o indicava como um planeta rico em sílica[19]. Observando essa figura proposta por Grasset e utilizando o exemplo de Léger (2011), podemos propor que o planeta Gliese 876 d (com uma massa de ≈ 6.67443 M_E e um raio de ≈ 2.15 R_E) está na região cinza da figura, o que significa que o planeta demonstra tanto uma composição de silicato e núcleo metálico, quanto uma composição de água (gelo). É importante ressaltar que essa conclusão pode ser modificada caso a massa ou, principalmente, o raio varie.

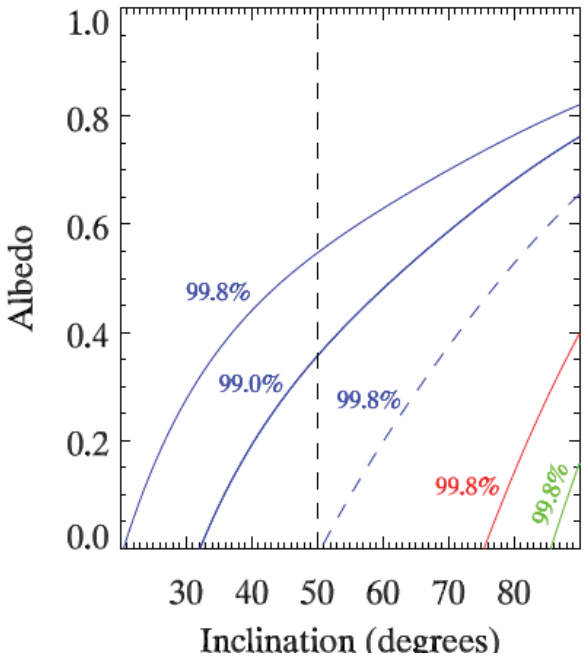
Um fator fundamental em relação à habitabilidade de um planeta é a presença ou ausência de uma atmosfera. Como discutido anteriormente, Joshi (1997) fez uma análise afirmando com um modelo teórico, a possibilidade de um planeta apresentar uma atmosfera quando orbitando uma estrela do tipo M. Seager et al. propôs em 2009 um gráfico que tentava relacionar o albedo e a inclinação do planeta, de modo a determinar se uma

[19] Cf. Seção 2.7.1 deste trabalho

Super-Terra com uma rotação síncrona e orbitando uma estrela do tipo M, poderia apresentar uma atmosfera.

Na figura abaixo, proposto por Seager et al. (2009), cada linha se refere aos valores da inclinação orbital e do albedo que iriam produzir uma modulação do fluxo sinusoidal de 8 μm, correspondendo para os limites superiores de confiança de 99.8% e 99%. A linha contínua azul corresponde a um planeta com pura água congelada. A linha pontilhada azul corresponde a um planeta oceânico "sujo" contendo 6.5% da massa de um núcleo de ferro, 48.5% de manto de silicato e 45% de gelo nas camadas externas, ou outras combinações diferentes com a mesma massa e raio. A linha vermelha representa uma composição semelhante a da Terra, tendo 32.5% de núcleo de ferro e 67.5% de manto de silicato. Já a curva verde corresponde a uma composição semelhante a Mercúrio, com 70% de núcleo de ferro e 30% de manto de silicato. Para que o planeta Gliese 876 d não apresente uma atmosfera, esse deve estar acima da linha correspondente a sua composição, enquanto que para o planeta ter uma atmosfera ele deve estar abaixo da linha correspondente a sua composição.

Figura 15 - Relação entre albedo e a inclinação do planeta (º) para quatro tipos de composição planetária com o objetivo de determinar a presença ou ausência de uma atmosfera no planeta GJ-876 d.



Fonte: Seager et al. (2009).

Considerando as informações obtidas anteriormente por meio da análise da figura de Grasset et al. (2009), o qual propõem que o Gliese 876 d apresenta uma composição de sílica, núcleo metálico e água (gelo), poderíamos tentar fazer um paralelo desta proposição com à classificação dada por Seager et al. em 2009. Ou seja, podemos considerar o planeta Gliese 876 d como sendo um planeta de oceano "sujo", com uma composição de 6.5% da massa total de núcleo de ferro, 48.5% de manto de silicato e 45% de gelo nas camadas externas. Segundo o "The Extrasolar Planets Encyclopaedia" a inclinação do Gliese 876 d é de 50º. Utilizando essas duas informações podemos inferir que, segundo a figura 15, o planeta Gliese 876 d, independente do seu albedo, estaria acima da curva, e assim o planeta não poderia conter uma atmosfera.

5. Conclusão

Para se delimitar a habitabilidade em exoplanetas os fatores mais importantes a serem considerados são: a força da maré; a temperatura; a atmosfera; os ciclos geoquímicos; e a presença de água. Munidos desses fatores podemos propor um ambiente teórico semelhante ao real. No entanto deve-se ressaltar que vários outros fatores podem influenciar a habitabilidade do planeta, apesar de que a influência geral deles será, na maioria das vezes, irrelevante.

Com esse trabalho, e utilizando as informações disponíveis na literatura, pudemos determinar a temperatura e a atmosfera dos planetas CoRoT-7 b, Kepler-11 f, Kepler-9 d, Gliese 581 g e Gliese 876 d.

Os organismos extremófilos encontrados até hoje são apenas uma pequena demonstração da totalidade destes micro-organismos, já que se estima existirem muitos mais ainda desconhecidos, como visto na tabela 6.

Tabela 6 - Estimativa da biodiversidade microbiana.

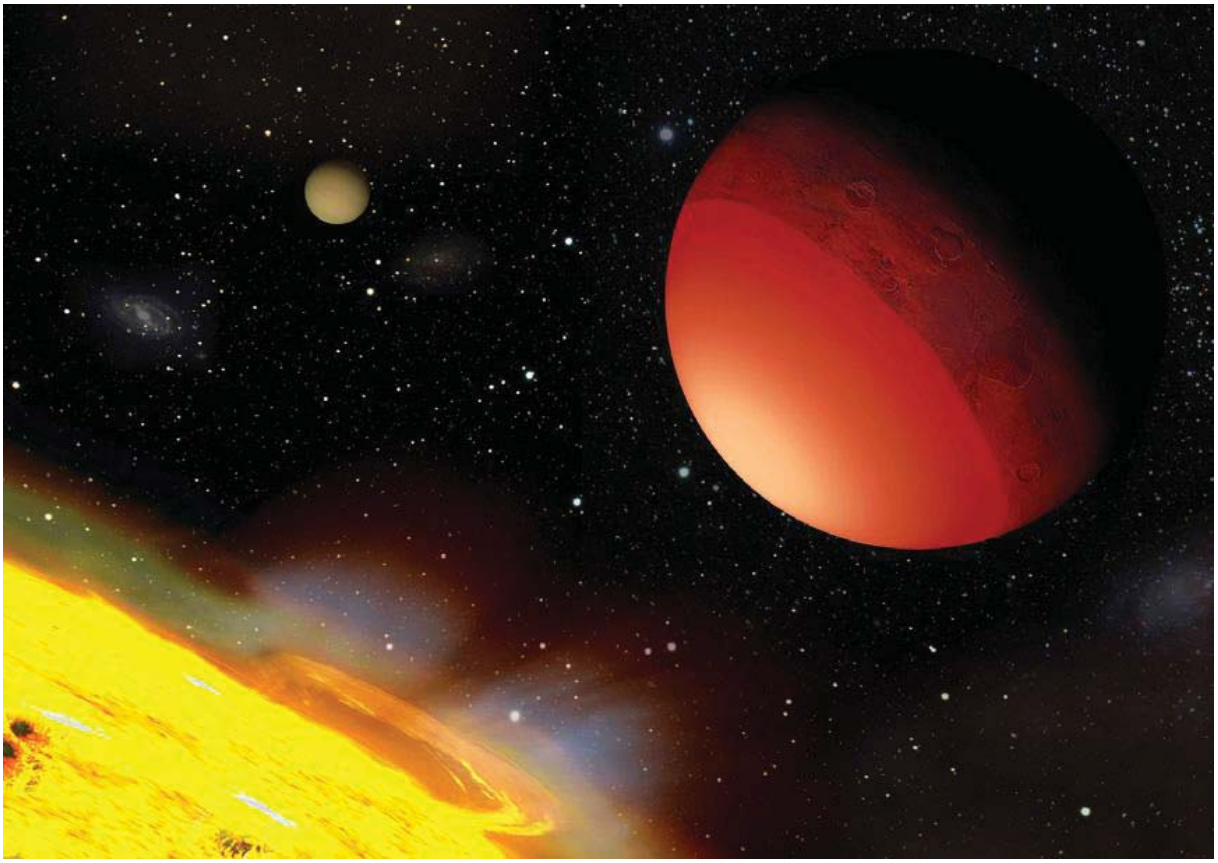
Grupo taxonômico	No. espécies descritas	No. espécies estimado	Conhecido (%)
Microrganismos			
• Fungos	69 000	1 500 000	5
• Procariotos	4 760	40 000 a 3 500 000	0,1 a 12
• Protozoários	30 800	100 000	31
• Vírus	5 000	130 000	4

Fonte: World Conservation Monitoring Centre (1992).

Entre os diversos tipos de extremófilos, os hipertermófilos são os organismos de maior interesse para a astrobiologia. Isso ocorre porque a maioria dos planetas encontrados até hoje apresentam rotação síncrona e são Super Terras Quentes, isto é, apresentando uma temperatura muito elevada, o que indica que os hipertermófilos seriam os organismos encontrados na Terra com maior probabilidade de habitar esses exoplanetas.

Com os nossos resultados, podemos propor um ambiente provável para o planeta CoRoT-7 b. Na imagem abaixo observamos uma visão artística do sistema CoRoT-7.

Figura 16 - Vista artística do sistema CoRoT-7



Fonte: Léger et al. (2011).

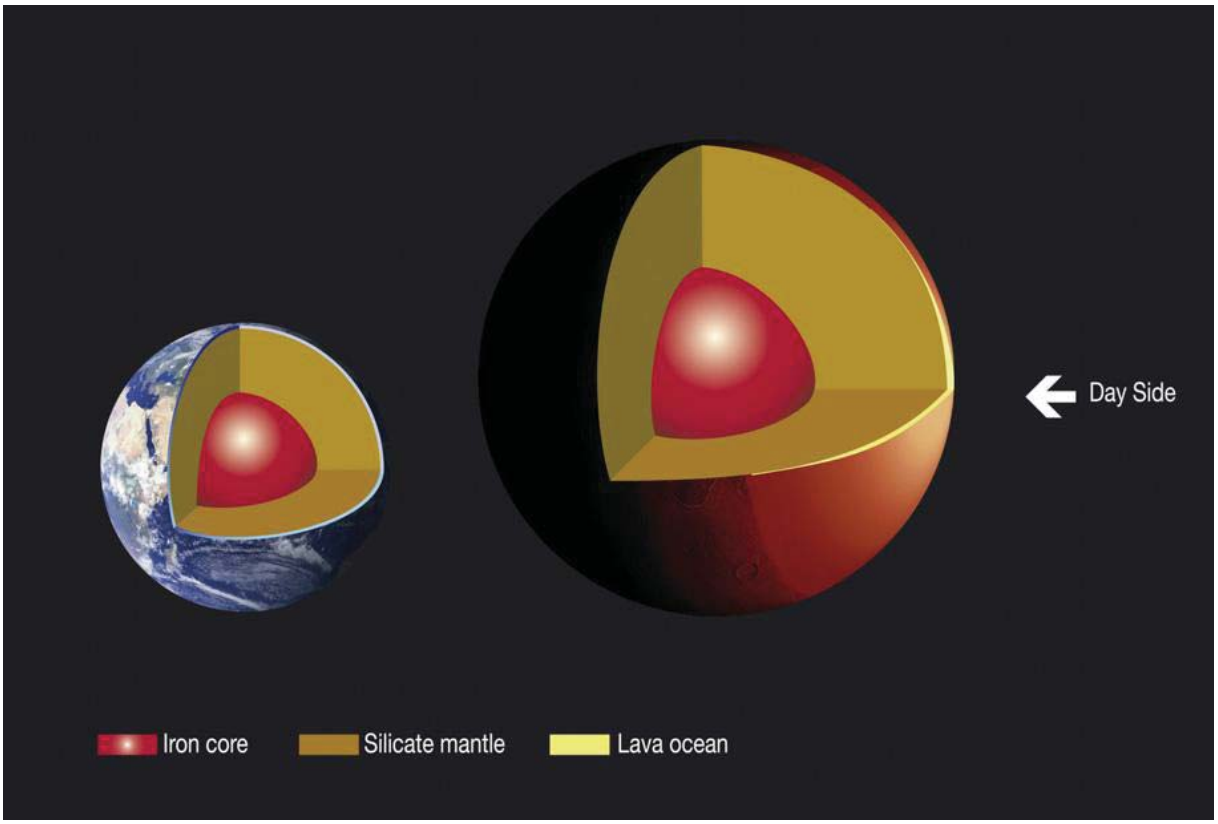
Na figura 16, visualiza-se mais a frente o planeta CoRoT-7 b, o segundo planeta (mostrado ao fundo) trata-se do CoRoT-7 c. Essa imagem não esta em escala, de modo que o tamanho do planeta, a distância até a estrela, e a luminosidade relativa do planeta e da estrela, não são reais.

Considerando os nossos resultados, quando há transporte de calor do lado iluminado para o lado escuro, temos uma temperatura de 1548ºC. Essa temperatura, levando-se em conta uma composição de BSE e de crosta continental, apresenta uma atmosfera com os elementos H, OH, CO, SO_2, em ordem de abundância.

Para uma energia recebida diretamente no ponto subestelar, isto é, sem transporte de calor, o planeta terá uma temperatura de 2302ºC. Considerando uma composição de BSE, o planeta demonstra uma atmosfera com os elementos H, OH, SO, S, CO, em ordem de abundância. Já se considerarmos uma composição de crosta continental, ele demonstrará uma composição de H, OH, CO, SO, O (em ordem de abundância).

Um planeta com essa atmosfera iria perder os elementos voláteis para o espaço como proposto por Léger e Schaefer (2011). Ele também não conteria uma superfície com água, já que a temperatura é mais elevada do que seu ponto de ebulição. Deste modo toda a água que poderia estar presente no planeta estaria na forma de vapor, e, considerando-se ainda o ponto de dissociação da H_2O, o H seria perdido para o espaço. O que nos leva a crer que esse planeta seria um planeta rochoso semelhante à Terra, mas sem H_2O na sua superfície. Como ilustrado na figura abaixo.

Figura 17- Estrutura interna do CoRoT-7 b comparado a Terra.



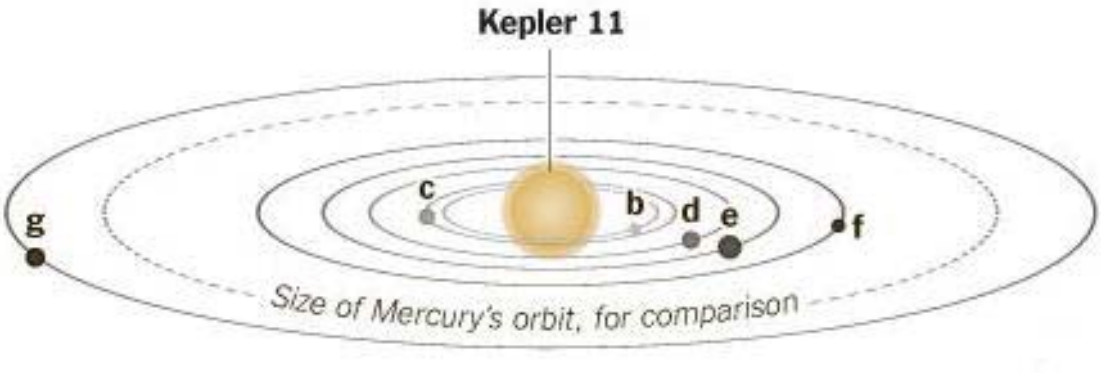
Fonte: Léger et al. (2011).

Essa figura mostra a estrutura interna do CoRoT-7 b comparado a Terra. A dimensão das diferentes camadas foi respeitada, exceto para a espessura do oceano de magma, a qual foi aumentada para melhor visualização.

Com essas conclusões podemos afirmar que o planeta não apresenta características que o permitam possuir vida, como conhecemos na Terra, na sua superfície até o momento. Tais conclusões se baseiam no fato de o planeta não ter uma temperatura e atmosfera adequadas e não possuir água líquida em sua superfície.

O sistema Kepler-11 é muito semelhante ao sistema solar como podemos ver na figura abaixo.

Figura 18 - Sistema Kepler-11 f



Fonte: Lopes (2011).

Para o planeta Kepler-11 f, aceitando o transporte de calor do lado iluminado para o lado escuro temos uma temperatura de 300ºC. Para uma energia recebida diretamente no ponto subestelar, isto é, sem transporte de calor, o planeta apresenta uma temperatura de 537ºC. Com essas temperaturas e admitindo-se uma composição de Komatiite, o planeta demonstra uma atmosfera composta de Na, O_2, O e Fe (em ordem de abundância).

O planeta Kepler-11 f apresenta uma temperatura mais amena, apesar disso ele ainda não esta em uma região ao redor da estrela que permite a presença de água líquida na superfície, sendo assim o planeta não possui a temperatura nem a presença de água requerida para a existência de vida como a conhecemos na Terra. No entanto, a sua atmosfera apresenta compostos relacionados à vida, incluindo biomarcadores como o O_2, o qual é um fator a ser considerado quando procuramos por planetas habitáveis.

No planeta Kepler-9 d, admitindo-se o transporte de calor do lado iluminado para o lado escuro tem uma temperatura de 1474ºC. Com essas temperaturas e considerando uma composição de Komatiite, o planeta apresenta uma atmosfera composta de Na, O_2, O e Fe (em ordem de abundância). Para uma energia recebida diretamente no ponto subestelar, isto é, sem transporte de calor, o planeta tem uma temperatura de 2198ºC. Com essas temperaturas e aceitando uma composição de Komatiite, o planeta apresenta uma atmosfera composta de Na, O_2, O, SiO, Fe e Mg (em ordem de abundância).

O planeta Kepler-9 d possui uma temperatura bem elevada, o que impede a presença de água líquida na superfície, sendo assim o planeta não apresenta a temperatura nem a presença de água requerida para a existência de vida, como a conhecemos na Terra. Apesar de que a sua atmosfera apresenta compostos relacionados à vida, incluindo biomarcadores como o O_2, o que como dito anteriormente é um fator positivo em relação a sua habitabilidade.

O planeta Gliese 581 g, caso seja comprovada a sua existência, é um dos planetas com maior interesse astrobiológico entre todos os estudados neste trabalho. Isso se deve ao fato deste planeta estar localizado em uma região semelhante à região onde a Terra se localiza, estando dentro da Zona habitável, indicando muito provavelmente a ocorrência de água líquida na sua superfície. Além de sua localização, Gliese 581 g possui uma temperatura ideal para muitos organismos existentes na Terra, de -35ºC admitindo-se um transporte de calor, e de 63ºC desconsiderando esse transporte. Ressalta-se ainda que, segundo propostas, ele pode ser um planeta rochoso e apesar de ter uma rotação síncrona, no seu ponto subestelar (63ºC), a temperatura é propícia para o desenvolvimento de vários organismos encontrados em hidrotermais na Terra, sendo os hipertermófilos os organismos de maior interesse nesse caso. Em contrapartida, acredita-se que caso haja um transporte de calor, teríamos uma temperatura menor e mais equilibrada (-35ºC), o que permitiria a existência de vida, e nesse caso, os psicrófilos seriam os organismos mais interessantes.

Por fim, para o último planeta estudado nesse trabalho, Gliese 876 d, tem-se caso aceito o transporte de calor do lado iluminado para o lado escuro uma temperatura de 397ºC. Para uma energia recebida diretamente no ponto subestelar, isto é, sem transporte de calor, o planeta apresenta uma temperatura de 675ºC. Esse planeta demonstra uma composição de silicato e água com um núcleo metálico, que é semelhante a da Terra, a qual também possui um núcleo metálico e um manto de sílica rodeado de água. Com essa proposta, e devido as suas características (distância da estrela, massa, raio e inclinação), Gliese 876 d é um planeta com pouca probabilidade de apresentar uma atmosfera. Um planeta sem uma atmosfera não

consegue manter vários elementos na sua superfície, elementos estes como, por exemplo, o O_2, que são essenciais para a sobrevivência de micro-organismos. Tais pontos, juntamente com a temperatura elevada, são empecilhos para a existência de vida na sua superfície, como a conhecemos na Terra.

Figura 19 - Vista artística do sistema Gliese 876.



Fonte: www.leviathanastronomy.com.

Na figura 19 é apresentada uma vista artística do sistema Gliese 876. Essa imagem não esta em escala, de modo que o tamanho do planeta, à distância até a estrela, e a luminosidade relativa do planeta e da estrela, não são reais.

Os planetas CoRoT-7 b, Kepler-11 f, Kepler-9 d e Gliese 876 d apresentam uma temperatura muito além dos limites encontrados até hoje para os extremófilos da Terra. A temperatura é um dos principais fatores que coloca como não habitáveis, os planetas muito próximos da estrela, e que esboçam uma rotação síncrona. No caso desses planetas a presença de uma atmosfera ou mesmo a variação da excentricidade não são suficientes (segundo os estudos) para permitir um ambiente adequado para presença de muitos dos organismos encontrados na Terra. Talvez se novas teorias e métodos forem elaborados, poderemos propor uma temperatura amena do lado iluminado ou ainda uma temperatura mais elevada do lado escuro, que permitiria a existência de algum tipo de vida.

Outro fator que se deve considerar seria as muitas descobertas que ainda podem ser feitas sobre a vida na Terra, de modo que talvez, futuramente, encontremos organismos aqui, que sejam ideais para viver nesses ambientes.

Em adição, devemos considerar a presença de organismos quimiolitotróficos, organismos esses que conseguem viver sem a presença de luz, sendo necessária primordialmente água líquida e nutriente para produção de energia. Esses organismos poderiam sobreviver na sub-superfície de um exoplaneta, região essa onde a temperatura seria amena e passível de ter água liquida.

Por fim, entendemos que os estudos de habitabilidade ainda estão muito superficiais e mais pesquisas devem ser realizadas na área para que assim, quem sabe, novos planetas e novas teorias possam encontrar exoplanetas habitáveis.

6. Referências Bibliografias

ALQUÉRES, S.M.C.; ALMEIDA, R.V.; CLEMENTINO, M.M.; VIEIRA, R.P.; ALMEIDA, W.I.; CARDOSO, A.M.; MARTINS, O.B. Exploring the biotechnologial applications in the archaeal domain. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v.38, n.3, Set., 2007.

ARNOLD F. H.; GIVER, L.; GERSHENSON, A.; ZHAO, H.; MIYAZAKI, K., Directed evolution of mesophilic enzymes into their thermophilic counterparts. MOLECULAR STRATEGIES IN BIOLOGICAL EVOLUTION, 1999, New York. **Annals of the New York Academy of Sciences**, New York, 1999, v. 870, p. 400-403.

ASGHARI, N.; BROEG, C.; CARONE, L.; CASAS-MIRANDA, R.; CASTRO PALACIO, J.C., CSILLIK, I, DVORAK, R.; FREISTETTER, F.; HADJIVANTSIDES, G.; HUSSMANN, H.; KHRAMOVA, A.; KHRISTOFOROVA, M.; KHROMOVA, I.; KITIASHIVILLI, I.; KOZLOWSKI, S.; LAAKSO, T.; LACZKOWSKI, T.; LYTVINENKO, D.; MILONI, O.; MORISHIMA, R.; MORO-MARTIN, A.; PAKSYUTOV, V.; PAL, A.; PATIDAR, V.; PEˇCNIK, B.; PELES, O.; PYO, J.; QUINN, T.; RODRIGUEZ, A.; ROMANO, C.; SAIKIA, E.; STADEL, J.; THIEL, M.; TODOROVIC, N.; VERAS, D.; VIEIRA NETO, E.; VILAGI, J.; VON BLOH, E.; ZECHNER, R.; ZHUCHKOVA, E. Stability of Terrestrial Planets in the Habitable Zone of Gl 777 A, HD 72659, Gl 614, 47 Uma and HD 4208. **Astronomy & Astrophysics manuscript no. hisp23**, Fev. 2008.

BARAFFE, I.; CHABRIER, G.; BARMAN, T. The physical properties of extra-solar planets. **Reports on Progress in Physics**, v. 73, n. 1, 2010.

BARNES, R.; RAYMOND, S.N.; Greenberg, R.; Jackson, B. CoRoT-7 b: Super-Earth or super-Io? **The Astrophysical Journal Letters**, v. 709, p. 95-98., Fev. 2010

BARNS, S. M.; FUNDYGA, R. E.; JEFFRIES, M. W.; PACE, N. R. Remarkable archaeal diversity detected in a Yellowstone National Park hot spring environment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.91, n.5, p. 1609-1613, 1994.

BEAN, J. L.; BENEDICT, G. F.; Endl, M. Metallicities of M Dwarf Planet Hosts from Spectral Synthesis. **The Astrophysical Journal**, v. 653, 2006.

BLÖCHL, E.; RACHEL, R.; BURGGRAF, S.; HAFENBRADL, D.; JANNASCH, H. W.; STETTER, K. O. *Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of A*rchaea*, extending the upper temperature limit for life to 113ºC. **Extremophiles** v. 1, p. 14-21, 1997.

BLOH, W.; CUNTZ, M.; FRANCK, S.; BOUNAMA, C. Habitability of the Goldilocks planet Gliese 581 g: Results from geodynamic models (Research Note). **Astronomy & Astrophysics**, Fev., 2011.

BOUTHIER DE LA TOUR, C.; PORTEMER, C.; NADAL, M.; STETTER, K. O.; FORTERRE, P.; DUGUET, M. Reverse gyrase, a hallmark of the hyperthermophilic archaebacteria. **Journal of Bacteriology**, v. 172, p. 6803-6808, 1990.

BROWN, J. R.; DOOLITTLE,W. F. Root of the universal tree of life based on ancient aminoacyl tRNA synthetase gene duplications. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA, v. 92, p. 2441–2445, 1995.

CALLEGARI, N. JR., RODRIGUEZ, A. Dynamics of equilibrium rotation of Super- Earths. **arXiv:1205.5704.** 2011.

CARONE, L.; GANDOLFI, D.; CABRERA, J.; HATZES, A. P.; DEEG, H. J.; CSIZMADIA, SZ.; PÄTZOLD, M.; WEINGRILL, J.; AIGRAIN, S.; ALONSO, R.; ALAPINI, A.; ALMENARA, J.-M.; AUVERGNE, M.; BAGLIN, A.; BARGE, P.; BONOMO, A. S.; BORDÉ, P.; BOUCHY, F.; BRUNTT, H.; CARPANO, S.; COCHRAN, W. D.; DELEUIL, M.; DÍAZ, R. F.; DREIZLER, S.; DVORAK, R.; EISLÖFFEL, J.; EIGMÜLLER, P.; ENDL, M.; ERIKSON, A.; FERRAZ-MELLO, S.; FRIDLUND, M.; GAZZANO, J.-C.; GIBSON, N.; GILLON, M.; GONDOIN, P.; GRZIWA, S.; GÜNTHER, E. W.; GUILLOT, T.; HARTMANN, M.; HAVEL, M.; HÉBRARD, G.; JORDA, L.; KABATH, P.; LÉGER, A.; LLEBARIA, A.; LAMMER, H.; LOVIS, C.; MACQUEEN, P. J.; MAYOR, M.; MAZEH, T.; MOUTOU, C.; NORTMANN, L.; OFIR, A.; OLLIVIER, M.; PARVIAINEN, H.; PEPE, F.; PONT, F.; QUELOZ, D.; RABUS, M.; RAUER, H.; RÉGULO, C.; RENNER, S.; DE LA REZA, R.; ROUAN, D.; SANTERNE, A.; SAMUEL, B.; SCHNEIDER, J.; SHPORER, A.; STECKLUM, B.; TAL-OR, L.; TINGLEY, B.; UDRY, S.; WUCHTERL, G. Planetary transit candidates in the CoRoT LRa01 field. **Astronomy & Astrophysics**, v.538, n.112. 2012.

CAVICCHIOLI, R. Extremophiles and the Search for Extraterrestrial Life. **Astrobiology 2**, Sydney,v. 2, n. 3, p. 281-292. 2002.

COCKELL, C.S. Life on Venus. **Planet Space Science**, v. 47, 1999.

DANSON, M. J.; HOUGH, D. W.; RUSSELL, R. J.; TAYLOR, G. L.; PEARL, L. Enzyme thermostability and thermoactivity. **Protein Engineering**, v. 9, p.629-30, 1996.

DOLE, S. H. **Habitable Planets for Man.** 1. Ed. New York, Blaisdell Publishing Company, 1964.

DUARTE, C. A.; LEONOR, E.S. R. D.; VÍTOR, G. B.; PEDRO V, E.S. D. **Em busca de vida para além da terra.** [s.n.]Lisboa, Mar., 2011.

EMPADINHAS, N.; MARUGG, J.; DA COSTA, M. S.; SANTOS, H. Path way for the synthesis of mannosylglycerate in *Pyrococcus horikoshii*: characterization of the recombinant key-enzymes. **Submetido,** 2001.

FAORO, H. **Determinação da biodiversidade de *Archaea* e *Bactéria* da mata atlântica paranaense.** 1. Ed. Curitiba: 2006. 172.

FOGG, M. J. An estimate of the prevalence of biocampatible and habitable planets. **Journal of the British Interplanetary Society**, v. 45, p. 3-12, 2012.

FORGET F, PIERREHUMBERT RT. Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation. **Science**, v. 14, p. 1273-1276, 1997.

FOURNIER, R. O. E ROWE J. J. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. **American Journal of Science Online**, v. 264, n. 9, p. 685-697, Nov., 1966.

GAO, S. Chemical composition of the continental crust: a perspective from China. **Geochemical News**, v. 143, Abr., 2010.

GERDAY, C.; AITTALEB, M.; BENTAHIR, M.;CHESSA, J. P.; CLAVERIE, P.; COLLINS, T.; D'AMICO, S.; DUMONT, J.; GARSOUX, G.; GEORLETTE, D.; HOYOUX, A.; LONHIENNE, T.; MEUWIS, M. A.; FELLER, G. Coldadapted enzymes: from fundamentals to biotechnology. **Trends in Biotechnology**, v. 18, p. 103-107, 2000.

GIORDANO, A.; CANNIO, R.; LA CARA, F.; BARTOLUCCI, S.; ROSSI, M.; RAIA, C.A. Asn249Tyr substitution at the coenzyme binding domain activates *Sulfolobus solfataricus* alcohol dehydrogenase and increases its thermal stability. **Biochemistry**, v. 38, p. 3043-3054, 1999.

GOGARTEN, J. P. et al., Evolution of the vacuolar HCATPase: implications for the origin of eukaryotes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA, v. 86, p. 6661–6665, 1989.

GRASSET, O.; SCHNEIDER, J.; SOTIN, C. A study of the accuracy of Mass-Radius relationships for silicate-rich and ice-rich planets up to 100 Earth masses. **Icarus**, v. 191, p. 337-351, 2007.

GRIBALDO, S.; BROCHIER-ARMANET, C. The origin and evolution of Archaea: a state of the art. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v.361, p. 1007–1022, 2006.

GRIBALDO, S.; CAMMARANO, P. The root of the universal tree of life inferred from anciently duplicated genes encoding components of the protein-targeting machinery. **Journal of Molecular Evolution**, v. 47, p. 508–516, 1998.

GUENTHER, E. W.; CABRERA, J.; ERIKSON, A.; FRIDLUND, M.; LAMMER, H.; MURA, A.; RAUER, H.; SCHNEIDER, J. Constraints on the exosphere of CoRoT-7b. **Astronomy & Astrophysics**, v. 525, A24, 2011.

HABERLE, R.M., MCKAY, C.P., TYLER, D., AND REYNOLDS, R. Can synchronously rotating planets support an atmosphere. In: CIRCUMSTELLAR HABITABLE ZONES, Menlo Park, CA, 1994. **Proceedings of the First International Conference**, Travis House Publications, Menlo Park, CA, 1994, p 29–34.

HART M.H., The evolution of the atmosphere of the Earth. **Icarus**, v. 33, p. 23–39. 1978.

HEATH, M.J.; DOYLE, L.R.; JOSHI, M.M.; HABERLE, R.M. Habitability of planets around red dwarf stars. **Origins Life**, v. 29, p. 405–424, 1999.

HENDRY, P. **Extremophiles: There's More to Life. Environmental Chemistry**, v. 3, p. 75–76. 2006.

HUBER, H.; HOHN, M. J.; RACHEL, R.; FUCHS, T.; WIMMER, V. C.; STETTER, K. O. A new phylum of Archaea represented by a nanosized hyperthermophilic symbiont. **Nature**, v. 417, p. 63–67, 2002.

IWABE, N.; KUMA, K.; HASEGAWA, M.; OSAWA, S.; MIYATA, T. Evolutionary relationship of archaebacteria, eubacteria, and eukaryotes inferred from phylogenetic trees of duplicated genes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA, v. 86, p. 9355–9359, 1989.

JAENICKE, R.; BÖHM, G. The stability of proteins in extreme environments. **Current Opinion in Structural Biology**, v. 8, p. 738-748, 1998.

JOSHI, M. Climate model studies of synchronously rotating planets. **Astrobiology, United Kingdom**, *v. 3, n. 2*, 2003.

JOSHI, M. M.; HABERLE, R. M.; REYNOLDS, R. T. Simulations of the Atmospheres of Synchronously Rotating Terrestrial Planets Orbiting M Dwarfs: Conditions for Atmospheric Collapse and the Implications for Habitability. **Icarus**, v. 129, p. 450–465, 1997.

KALTENEGGER, L.; SELSIS, F. Biomarkers Set in Context. In: Rudolf Dvorak (Org.). **Extrasolar Planets: Formation, detection and Dynamics**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2008.

KARGEL, J.S.; LEWIS, J.S. The composition and early evolution of earth. **Icarus**, v. 105, n. 1, 1993.

KASTING, J. F.; CATLING D. Evolution Of A Habitable Planet. Annual Review of **Astronomy and Astrophysics**, v. 41, p. 429-463

KASTING, J.F., WHITMIRE, D.P., AND REYNOLDS, R.T. Habitable zones around main sequence stars. **Icarus**, v. 101, p. 108–128, 1993.

KAWARABAYASI, Y.; SAWADA, M.; HORIKAWA, H.; HAIKAWA, Y.; HINO, Y.; YAMAMOTO, S.; SEKINE, M.; BABA, S.; KOSUGI, H.; HOSOYAMA, A.; NAGAI, Y.; SAKAI, M.; OGURA, K.; OTSUKA, R.; NAKAZAWA, H.; TAKAMIYA, M.; OHFUKU, Y.; FUNAHASHI, T.; TANAKA, T.; KUDOH, Y.; YAMAZAKI, J.; KUSHIDA, N.; OGUCHI, A.; AOKI, K.; YOSHIZAWA, T.; NAKAMURA, Y.; ROBB, F.; HORIKOSHI, K.; MASUCHI, Y.; SHIZUYA, H.; KIKUCHI, H. Complete Sequence and Gene Organization of the Genome of a Hyper-thermophilic Archaebacterium, *Pyrococcus horikoshii* OT3. **DNA RESEARCH**, v. 5, p. 55-76, 1998.

KITE, E.; GAIDOS, E.; MANGA, M. Climate instability on tidally locked Exoplanets. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 743, n. 41, 2011.

LADENSTEIN, R.; ANTRANIKIAN, G. Proteins from hyperthermophiles: stability and enzymatic catalysis close to the boiling point of water. **Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology**, v. 61, p. 37-85, 1998.

LAMMER, H.; BREDEHÖFT, J. H.; COUSTENIS, A.; KHODACHENKO, M. L.; KALTENEGGER, L.; GRASSET, O.; PRIEUR, D.; RAULIN, F.; EHRENFREUND, P.;

YAMAUCHI, M.; WAHLUND, J. E.; GRIEßMEIER, J. M.; STANGL, G.; COCKELL, C. S.; KULIKOV, YU. N.; GRENFELL, J. L.; RAUER, H. What makes a planet habitable? **The Astronomy and Astrophysics Review**, v. 17, p. 181-249, 2009.

LAMMER, H.; KHODACHENKO, M. L.; KHODACHENKO, M. L., HERBERT, I. M., LICHTENEGGER, I. M., KULINOV, Y. N. Impact of Stellar Activity on the Evolution of Planetary Atmospheres and Hability. In: Rudolf Dvorak (Org.). **Extrasolar Planets: Formation, detection and Dynamics.** Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2007.

LAWSON, F. S., CHARLEBOIS, R. L.; DILLON, J. A. Phylogenetic analysis of carbamoylphosphate synthetase genes: complex evolutionary history includes an internal duplication within a gene which can root the tree of life. **Molecular Biology and Evolution**, v. 13, p. 970–977, 1996.

LECOMPTE, O.; RIPP, R.; THIERRY, J.; MORAS, D.; POCH, O. Comparative analysis of ribosomal proteins in complete genomes: an example of reductive evolution at the domain scale. **Nucleic Acids Research**, v. 30, n. 24, p. 5382-5390, 2002.

LAMOSA, P.; BURKE, A.; PEIST, R.; HUBER, R.; LIU, M.Y.; SILVA, G.; RODRIGUES-POUSADA, C.; LEGALL, J.; MAYCOCK, C.; SANTOS, H. Thermostabilization of proteins by diglycerol phosphate, a new compatible solute from the hyperthermophile *Archaeoglobus fulgidus*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 66, p. 1974-1979, 2000.

LÉGER, A. ET AL., Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VIII. CoRoT-7b: The first super-Earth with measured radius. **Astronomy Astrophysics**, v. 506, p. 287–302, 2009.

LÉGER, A., et al. The extreme physical properties of the CoRoT-7b super-Earth. **Icarus**, 2011, doi:10.1016/j.icarus.2011.02.004.

LEVIATHANASTRONOMY.COM, 2011. Disponível em: <http://www.leviathanastronomy.com/extrasolar-planets.html>. Acesso em: 2 de outubro de 2012.

LONDEI, P. Evolution of translational initiation: new insights from the *Archaea.* FEMS Microbiology Reviews, v. 29, p. 185–200, 2005.

LOPES, L., ASTROPT, 2011. Disponível em < http://astropt.org/blog/2011/02/02/kepler-11-e-familia-e-primeiros-candidatos-na-zona-habitavel/>. Acesso em: 2 de outubro de 2012.

MACELROY, R. D. Some comments on the evolution of extremophiles. **Biosystems**, v. 6, p. 74-75, 1974.

MAKAROVA K. S., ARAVIND L., GRISHIN N. V., ROGOZIN I. B., KOONIN E. V. A DNA repair system specific for thermophilic Archaea and bacteria predicted by genomic context analysis. **Nucleic Acids Research**, v. 30, n. 2, p. 482–496, Jan., 2002.

MIGUEL, Y.; KALTENEGGER, L.; FEGLEY, B.; SCHAEFER, L. Compositions Of Hot Super-Earth Atmospheres: Exploring Kepler Candidates. **The Astrophysical Journal Letters**, USA, v.742, Dec., 2011.

MILLER, S. L. E BADA, J. L. Submarine hot springs and the origin of life. **Nature**, v.334, p. 609-611, Aug. 1988

NASA, Kepler, 2012.Disponível em:<http://www.kepler.nasa.gov/> Acesso em: 27 de agosto de 2012.

NESBITT, R. W.; SUN, S.; PURVIS, A. C. Komatiites: Geochemistry and Genesis. **Canadian Mineralogist**, v. 17, p. 165-186, 1979.

OLSEN, G. J.; WOESE, C. R. Lessons from an Archaeal genome: what are we learning from Methanococcus jannaschii? **Trends in Genetics**, v. 12, p. 377–379, 1996.

PIERREHUMBERT, R. T. A PALETTE OF CLIMATES FOR GLIESE 581g. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 726, Jan., 2011.

PLANETARY HABITABILITY LABORATORY, The habitable exoplanets catalog, 2012. Disponível em <http://phl.upr.edu./home>. Acesso em: 27 de julho de 2012.

QUELOZ, D. et al., The CoRoT-7 planetary system: Two orbiting super-Earths**. Astronomy Astrophysics,** v. 506, p. 303–319, 2009.

RAMOS, A.; RAVEN, N. D. H.; SHARP, R. J.; BARTOLUCCI, S.; ROSSI, M.; CANNIO, R.; LEBBINK, J.; VAN DER OOST, J.; DE VOS, W. M.; SANTOS, H. Stabilization of enzymes against thermal stress and freeze-drying by mannosylglycerate. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 63, p.4020-4025, 1997.

ROTHSCHILD, L. J.; MANCINELLI, R. L. Life in extreme environments. **Nature**, v. 409, n.22, Fev. 2001.

SAGAN, C. **Cosmos**. 2 Ed. Rio de Janeiro, Universidade de Brasília, 1982.

SANTOS, H.; LAMOSA, P.; COSTA, M. Extremófilos: microrganismos à prova de agressões ambientais extremas. **Boletim de Biotecnologia**, Coimbra, v. 69, p.2-10. 2001

SCHAEFER, L.; FEGLEY Jr., B. Chemistry of silicate atmospheres of evaporating super-Earths. **The Astrophysical Journal Letter**s, v. 703, p. 113–117, 2009.

SCHAEFER, L.; LODDERS, K.; FEGLEY, B., Jr. Vaporization of the Earth: Application to Exoplanet Atmospheres. **Submitted to the Astrophysical Journal**, 2011.

SCHMITT, J. H. M. M.; FLEMING, T. A.; GIAMPAPA, M. S. The X-ray view of the low-mass stars in the solar neighborhood . **The Astrophysical Journal**, v. 450, n. 9, p. 392-400, 1995.

SCHNEIDER, J. **The Extrasolar Planets Encyclopaedia**. Paris. Paris observatory. 2012. Disponível em: < http://exoplanet.eu/biblio.php>. Acesso em: 31 mar. 2012.

SEAGER, S.; DEMING, D. On the method to infer an atmosphere on a tidally-locked super earth exoplanet and upper limits to GJ 876d. **arXiv:0910.1505v1**, Out., 2009.

SELSIS, F., KALTENEGGER, K., PAILLET, J. Terrestrial exoplanets: diversity, habitability and characterization. **Physica Scripta**, v. 2008, 2008.

SILVA, P. Vulcanismo e Sismologia: Sismologia, 2006. Disponível em: <http://www.notapositiva.com/resumos/geologia/vulcansismolog.htm> Acesso em: 22 de setembro de 2012.

SINISTERRA, J. V. Microorganismos extremófilos, 201-. Disponível em: <http://www.ucm.es/info/btg/personales/jvsgago/termof.pdf> Acesso em 20 de setembro de 2011.

SPIEGEL, DAVID S.; RAYMOND, SEAN N.; DRESSING, COURTNEY D.; SCHARF, CALEB A.; MITCHELL, JONATHAN L. Generalized Milankovitch cycles and long-term climatic hability. **The Astrophysical Journal**, v. 721, p.1308-1318. 2010.

STETTER, K.O. Hyperthermophiles in the history of life. **Ciba Foundation symposium**, v. 202, p. 1-18, 1996.

SZILÁGYI A. ZÁVODSZKY P. Structural differences between mesophilic, moderately thermophilic and extremely thermophilic protein subunits: results of a comprehensive survey. **Structure**, v. 8, n. 5, p. 493-504, 2000.

TRENT, J. Extremophiles in Astrobiology: Per Ardua ad Astra. **Gravitational and Space Biology Bulletin**, v.13, n. 2, p. 5-12, Jun., 2000.

VALENCIA, D. Characterising Super-Earths. In: EPJ Web of Conferences, 11. 2011. Seção 3: Atmospheres and interiors of exoplanets. EDP Sciences, 2011. Artigo número 03001. Disponível em: <http://www.epj-conferences.org> <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20101103001>. Acesso em: 15 dez. 2011.

VALENTINE, D. L. Adaptations to energy stress dictate the ecology and evolution of the Archaea. **Nature reviews/Microbiology**, v. 5, p. 316-323, Abr. 2007.

VOGT, S. S.; BUTLER, R. P.; HAGHIGHIPOUR, N. GJ 581 update: Additional evidence for a Super-Earth in the habitable zone. **Astronomische Nachrichten**, v. 333, n. 7, p. 561-575, 2012.

WETHERILL, G.W. The formation and habitability of extra-solar planets. **Icarus**, v. 119, p. 219–238, 1996.

WILLIAMS, D. M.; POLLARD, D. Earth-like worlds on eccentric orbits: excursions beyond the habitable zone. **International Journal of Astrobiology**, v. 1, p. 61–69, 2002.

WITHBROE, G.L.; NOYES, R.W. Mass and energy flow in the solar chromospheres and corona. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 15, p. 363–387, 1977.

WOESE C. R., KANDLER O., WHEELIS M. L. Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains *Archaea, Bacteria,* and *Eucarya*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 87, p. 4576-4579, Jun., 1990.

WORLD CONSERVATION MONITORING CENTRE. Global biodiversity: status of the Earth's living resources. **Chapman e hall**, London, 1992.

Ana Paula Mendes Emygdio	Prof. Dr. Nelson Callegari Junior
Graduanda em Ciências Biológicas	Orientador