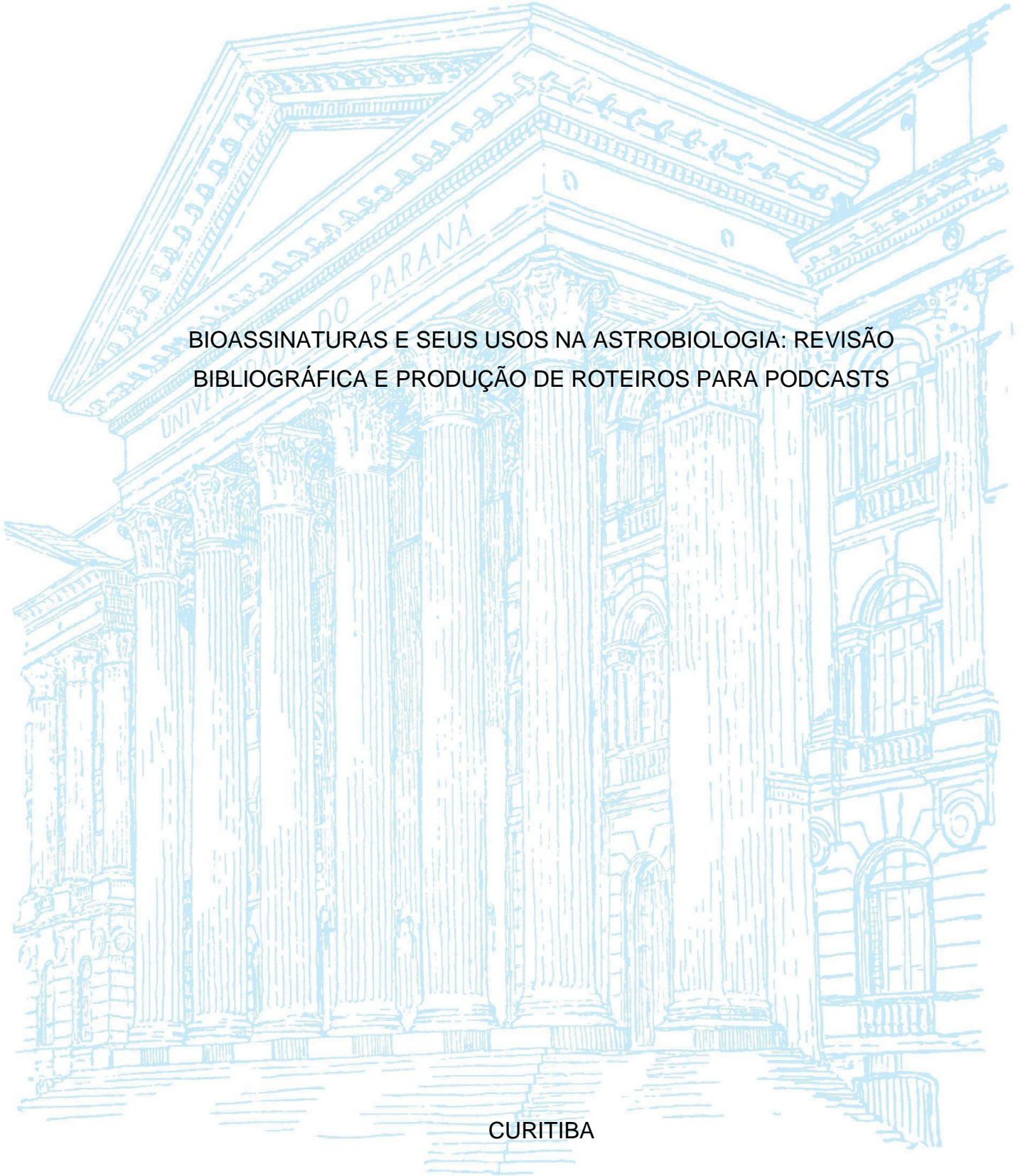


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SOFIA SILVEIRA LUDERS

BIOASSINATURAS E SEUS USOS NA ASTROBIOLOGIA: REVISÃO  
BIBLIOGRÁFICA E PRODUÇÃO DE ROTEIROS PARA PODCASTS

CURITIBA



2021

SOFIA SILVEIRA LUDERS

BIOASSINATURAS E SEUS USOS NA ASTROBIOLOGIA: UM ESTUDO EM  
PODCASTS

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Ciências Biológicas, Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientadora: Prof(a). Dr(a). Lupe Furtado Alle

CURITIBA

2021

## TERMO DE APROVAÇÃO

SOFIA SILVEIRA LUDERS

### BIOASSINATURAS E SEUS USOS NA ASTROBIOLOGIA: UM ESTUDO EM PODCASTS

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Ciências Biológicas, Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.



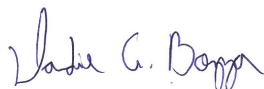
---

Prof(a). Dr(a). Lupe Furtado Alle  
Orientador(a) – Departamento de Genética, UFPR



---

Prof(a). Dr(a) Luciane Viater Tureck  
Departamento de Genética, UFPR



---

Doutorando Dandie Antunes Bozza Me.  
PPG-GEN, UFPR

Curitiba, 16 de agosto de 2021.



## **AGRADECIMENTOS**

Meus primeiros agradecimentos a Universidade Federal do Paraná. A todos os professores, técnicos, funcionários, colegas e tantos outros profissionais que fizeram da minha graduação o que foi e que todos os dias defendem a ciência e as universidades públicas com unhas e dentes.

Também gostaria de agradecer minha orientadora, Prof(a). Dr(a). Lupe Furtado Alle, e a minha família e amigos por tudo que fizeram por mim durante os anos. Nada disso teria sido possível sem vocês.

## RESUMO

Astrobiologia é a área que estuda o passado, presente e futuro da vida no universo. Dentre todos os seus objetos de estudo, bioassinaturas são elementos que possuem uma origem biológica e, assim, indicam a presença de vida. Buscando formular uma bibliografia em português sobre o tema, foi feita uma revisão bibliográfica do tipo narrativa, resumindo estudos de bioassinaturas e suas aplicações para a astrobiologia. São apresentados os temas “introdução e histórico da astrobiologia”, “bioassinaturas e suas categorias”, “principais exemplos”, “locais de interesse para estudo no Sistema Solar e exoplanetas” e “futuras missões espaciais”. Com base nesta revisão, foram produzidos 10 roteiros de podcast de curta duração para divulgação científica, a serem futuramente gravados e disponibilizados ao público-alvo de estudantes do ensino médio e universidades.

Palavras-chave: astrobiologia; bioassinatura; podcast; divulgação científica

## **ABSTRACT**

Astrobiology is the field that studies the past, present and future of life in the universe. Among all its subjects, we here discuss biosignatures, which are elements with a biological origin, and therefore indicate the presence of life. A bibliographic review was made, summarizing the studies of biosignatures and their applications to astrobiology, with the intent of producing material about the subject in portuguese. The topics studied were "introduction and history of astrobiology", "biosignatures and their categories", "most important examples", "places of interest in the Solar System and exoplanets" and "future space missions". Based on this review, 10 short podcast scripts were produced for public consumption, which will be recorded in the future and made available to the target audience of high school and university level students.

Keywords: astrobiology. biosignature. podcast.

## **SUMÁRIO**



<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivos gerais	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>4</b>
2.1	ASTROBIOLOGIA, INTRODUÇÃO E HISTÓRICO	4
2.2	REQUERIMENTOS PARA A VIDA	5
2.3	<b>Erro! Indicador não definido.</b>	<b>5</b>
2.4	BIOASSINATURAS	6
2.5	BIOASSINATURAS GASOSAS	8
2.5.1	<b>Erro! Indicador não definido.</b>	<b>9</b>
2.5.2	Ozônio	10
2.5.3	Metano	10
2.5.4	Óxido Nitroso	11
2.6	BIOASSINATURAS DE SUPERFÍCIE	12
2.7	BIOASSINATURAS TEMPORAIS	13
2.8	A EVOLUÇÃO DA ATMOSFERA TERRESTRE	13
2.9	FOCOS DE INTERESSE NO SISTEMA SOLAR	15
2.9.1	Marte	15
2.9.2	Venus	16
2.9.3	<b>Erro! Indicador não definido.</b>	<b>17</b>
2.9.3.1	Europa	17
2.9.3.2	Titã	18
2.10	EXOPLANETAS	19
2.11	NOVOS HORIZONTES	20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>	<b>25</b>
4.1	EPISÓDIO 1 - INTRODUÇÃO E HISTÓRICO	25
4.2	EPISÓDIO 2 - REQUERIMENTOS PARA A VIDA, DEFINIÇÃO DE HABITABILIDADE E A EVOLUÇÃO DA ATMOSFERA TERRESTRE	26
4.3	EPISÓDIO 3 - BIOASSINATURAS	28

4.4	EPISÓDIO 4 - BIOASSINATURAS GASOSAS, DE SUPERFÍCIE E TEMPORAIS	29
4.5	EPISÓDIO 5 - OXIGÊNIO E OZÔNIO	31
4.6	EPISÓDIO 6 - METANO E ÓXIDO NITROSO	32
4.7	EPISÓDIO 7 - MARTE E VÊNUS	34
4.8	EPISÓDIO 8 - <i>OCEAN WORLDS</i>	36
4.9	EPISÓDIO 9 - EXOPLANETAS	38
4.10	EPISÓDIO 10 - NOVOS HORIZONTES	39
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>41</b>

**Erro! Indicador não definido.43**

## 1 INTRODUÇÃO

Astrobiologia é definida como a área de estudo da vida no universo. Busca compreender as interações físicas, químicas, biológicas, planetárias e astrofísicas em um determinado ambiente que possam permitir a existência e manutenção de vida, e a sua coevolução com tal ambiente. Dentro disso, estuda temas como extremófilos (organismos terrestres que vivem sob condições extremas análogas a ambientes extraterrestres), a formação e comportamento de moléculas orgânicas no espaço, a possibilidade de vida com uma composição química diferente da terrestre, entre outros. É uma área que conta com a participação de uma grande variedade de disciplinas, como biologia, geologia, física, astronomia, etc.

Com as tecnologias atuais, um dos métodos mais promissores para a área é a detecção de sinais de vida de maneira remota. Estes sinais, denominados bioassinaturas, são modificações no ambiente causadas pela presença de organismos vivos. A pesquisa em bioassinaturas é uma maneira de determinar quais astros são de maior interesse astrobiológico para maiores investimentos em análises *in situ*.

A astrobiologia é uma área cativante, tanto para acadêmicos quanto para o público em geral, e uma das principais áreas a serem exploradas nas próximas missões espaciais (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2019). Assim, vemos uma oportunidade de transmitir o conhecimento das universidades a um público interessado.

No Brasil, a área de astrobiologia ainda não possui grande espaço. As pessoas que desejam trabalhar na área não têm acesso a um curso de graduação específico de astrobiologia, realizando cursos de especialização, mestrado ou doutorado em seguida. Mesmo assim, são poucas as instituições que oferecem oportunidades na área, como a Universidade de São Paulo que possui um Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.

Também há uma notável falta de materiais sobre o assunto em português, tanto de bibliografia acadêmica quanto de materiais de divulgação científica para um público mais amplo. Um dos métodos de divulgação científica interessantes para este fim é o uso de podcasts.

Podcasts são arquivos de áudio, distribuídos online por meio de plataformas especializadas, *on demand*, entre outras. De acordo com MacKenzie (2019), houve um crescimento linear de podcasts científicos entre 2004 e 2010, que se tornou exponencial entre 2010 e 2018. O consumo de podcasts de ciência pode resultar em um aumento de interesse pelo tema e oferecem um método eficaz de divulgação que pode ser feito pelo próprio cientista (MARTIN et al, 2020). Certas características de podcasts fazem com que estes supram as lacunas deixadas por aulas tradicionais. Podcasts costumam ter um tempo de duração menor do que aulas expositivas, e o aluno tem a oportunidade de escolher o que mais lhe interessa. São também de fácil acesso e portáteis, podendo ser adquiridos em qualquer momento com acesso a internet ou baixados anteriormente (KAPLAN et al, 2020). Outra de suas principais vantagens é a possibilidade de consumir um podcast enquanto realiza outras atividades, sem precisar de sua atenção ininterrupta (MACKENZIE, 2019).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Astrobiologia é uma área pouco desenvolvida no Brasil. Em países onde ela é mais estudada, como nos Estados Unidos, a astrobiologia é oferecida como uma disciplina optativa em algumas universidades. No geral, pessoas que buscam trabalhar na área podem fazer isso por meio de mestrados e doutorados na área, não tendo um curso específico de graduação que precisa ser feito.

Há uma falta notável de materiais sobre o tema em português, o que torna a área inacessível para grande parte da população do Brasil. Utilizando a palavra-chave “astrobiologia” na plataforma Google Scholar, aparecem 697 resultados em português e 4.800 em inglês. Utilizando a palavra-chave “astrobiology” na mesma plataforma, apresentam-se 465 resultados em português e 271.000 em inglês.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo produzir uma bibliografia e um podcast de divulgação científica sobre astrobiologia, com foco em bioassinaturas, em português. Este material é destinado a estudantes do ensino médio e universitários.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar a área da astrobiologia em relação ao seu contexto histórico e interesses futuros, visando a divulgação da área.
- Relatar como é feita a teorização das bioassinaturas mais promissoras na busca por vida, de forma a demonstrar o processo e a natureza especulativa das pesquisas no tema.
- Apresentar as bioassinaturas mais promissoras e suas respectivas características, visando a informação.
- Demonstrar a importância de considerar a possibilidade da existência de organismos fundamentalmente diferentes dos que se desenvolveram na Terra, de modo a demonstrar a ambiguidade da questão.
- Detalhar os astros de maior interesse astrobiológico no Sistema Solar e quais são as suas características mais ou menos promissoras, para explicar as futuras missões espaciais planejadas.
- Descrever o interesse em exoplanetas para a astrobiologia.
- Detalhar algumas das próximas missões espaciais que tem como foco a busca por sinais de vida, visando a informação sobre o futuro.
- Produção de materiais de divulgação científica (podcast).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ASTROBIOLOGIA, INTRODUÇÃO E HISTÓRICO

Astrobiologia é, em sua forma mais básica, a área da ciência que estuda a vida no universo. Isto inclui como ela se inicia, como se dá sua evolução e desenvolvimento, especulações de seu futuro, e distribuição no espaço. É uma ciência fundamentalmente interdisciplinar, incluindo áreas como astronomia, biologia e geologia.

A história da astrobiologia está interligada com a história da exploração espacial como um todo. Em 1957, ocorreu o lançamento do primeiro satélite, juntamente com a primeira conferência internacional sobre as origens da vida na Terra. O primeiro projeto de astrobiologia da NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço), que antes era chamada exobiologia, foi criado em 1959, apenas um ano depois da fundação do Comitê de Pesquisa Espacial, COSPAR, e da própria NASA, cujo Programa de Exobiologia veio logo em seguida, em 1960 (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2019). O Instituto de Astrobiologia da NASA, NAI, foi criado em 1998. Este instituto é responsável pela publicação dos documentos norteadores da pesquisa em astrobiologia, os *NASA Astrobiology Roadmaps*. Estes documentos apresentam uma série de objetivos de forma a direcionar futuras pesquisas em astrobiologia.

O primeiro *Roadmap* foi publicado em 1998, apresentando três principais questionamentos gerais - “como a vida se inicia e evolui”, “existe vida em algum outro local no universo”, e “qual é o futuro da vida na Terra e fora dela”. Todos os *Roadmaps* possuem estas perguntas como base, mas variam em seus objetivos específicos. Foram feitas novas versões em 2003 e 2008. A mais recente é a de 2015 que, ao contrário das anteriores, apresenta seus objetivos divididos de acordo com específicos temas de pesquisa dentro da astrobiologia (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2019).

Desde então, houveram avanços significativos em pesquisas na área. Avanços tecnológicos permitiram a detecção de 4.455 exoplanetas na Via Láctea (NASA, 2021a), assim como indicações de ambientes habitáveis em astros do Sistema Solar, como Enceladus (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND

MEDICINE, 2019). A descrição de atmosferas, principal fonte de informações sobre o potencial biológico de um determinado astro, é o principal foco de missões espaciais nas próximas décadas (CLAUDI, 2017).

Os estudos em bioassinaturas são feitos com base no que é observado na Terra. Ambientes terrestres que apresentem condições similares ao corpo celeste de interesse, chamados *planetary field analogues*, podem ser utilizados como substitutos mais acessíveis. Dessa forma, astrobiólogos podem estudar organismos que vivem nestas condições e quais seriam as suas bioassinaturas detectáveis. Desertos, por exemplo, são utilizados como campo de testes para missões de superfície em planetas com condições similares, como Marte, e estudos astrobiológicos são realizados em locais onde organismos vivem em condições extremas, como fontes hidrotermais (NASA, 2021b). Algumas condições também podem ser simuladas em laboratório.

## 2.2 REQUERIMENTOS PARA A VIDA

Para procurar sinais de vida é primeiro necessário definir o que é considerado “vida”. Mas fazer isto com base apenas nos compostos utilizados e formados por seres vivos terrestres limitaria os resultados demasiadamente. Levando esta necessidade por uma definição mais ampla em consideração, podemos afirmar que existem três critérios básicos que permitem reações metabólicas e, assim, a existência de vida: uma fonte de energia, um solvente líquido e a presença de nutrientes para a formação de enzimas e de biomassa (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

Mesmo com esta definição aberta, o estudo da possibilidade de vida extraterrestre é feito a partir do único exemplo de vida que conhecemos, com base de carbono e uso de água líquida como solvente.

## 2.3 HABITABILIDADE

Habitabilidade é descrita por Cockell (2016) como a capacidade que um certo ambiente tem de sustentar o funcionamento de qualquer organismo vivo por um período de tempo. Também é importante notar que esta definição está diretamente ligada aos organismos que atendem os requerimentos para a vida indicados no item

anterior, ou seja, identificáveis como seres vivos de acordo com as características terrestres.

Determinar se um planeta pode ser considerado habitável depende de muitas variáveis. Por exemplo, os astros rochosos localizados na chamada “zona habitável” da estrela que orbita. A zona habitável indica a região orbital na qual a distância entre o astro e sua estrela permite a existência de água em estado líquido em sua superfície. Isto depende do tipo de estrela, pois as pequenas e com uma luminosidade menor possuem a zona habitável mais próxima a ela (CLAUDI, 2017). É importante, no entanto, considerar que astros fora da zona habitável também podem ter água líquida. Especula-se que Plutão, por exemplo, tenha um oceano líquido abaixo de sua superfície que permita condições habitáveis (SCHWIETERMAN et al, 2018b).

Dessa forma, as características que indicam habitabilidade não são universais. É necessário levar em consideração variáveis como radiação da estrela, as variações em temperatura consequência do efeito estufa em planetas rochosos e presença de água líquida em alguma camada do astro. Também considera-se a possibilidade de um ambiente habitável tornar-se inabitável, ou vice versa, por meio de ações internas e externas do planeta.

A existência de condições favoráveis ao desenvolvimento de seres vivos também não indica necessariamente que isto tenha ocorrido. Para isto, são consideradas as chamadas bioassinaturas, foco deste trabalho (SCHWIETERMAN et al, 2018b).

## 2.4 BIOASSINATURAS

Bioassinaturas são definidas pelo primeiro *Astrobiology Roadmap* da NASA como um elemento (objeto, substância ou padrão) cuja origem seja um agente biológico (WALKER et al, 2018). Esta definição, proposta em 1998 por de Marais, ainda é a mais convencionalmente aceita. Em outras palavras, bioassinaturas sinalizam o impacto que processos biológicos têm sobre o ambiente (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2019). Estudos também estão sendo realizados em “anti bioassinaturas”, que indicariam a ausência de vida.

As melhores bioassinaturas são geralmente aquelas que atendem a três critérios principais; *reliability*, que diz respeito à probabilidade de que a bioassinatura em questão seja realmente um produto de processos biológicos; *survivability*, que



determina a sua capacidade de permanecer detectável em um ambiente e resistir à degradação; e *detectability*, que indica a sua capacidade de ser detectado pelos métodos atuais, considerando seu comprimento de onda em relação a outros elementos e sua provável localização na atmosfera (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2019; MEADOWS et al, 2018).

Uma bioassinatura deve também sempre ser considerada em relação ao ambiente em que se encontra, de modo a evitar falsos negativos e falsos positivos. O oxigênio, que será discutido com maiores detalhes na seção 2.5.1, é um exemplo. Outras características devem ser levadas em consideração, como a localização do corpo celestial em relação à zona habitável, outras potenciais bioassinaturas que forem detectadas junto com o oxigênio, entre outras (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

Considerando estas dificuldades, é importante notar que a determinação de uma bioassinatura exoplanetária é sempre considerada como potencial, mantendo uma parcela de dúvida. Também não há um consenso altamente distribuído na área de categorização de bioassinaturas (SCHWIETERMAN et al, 2018c). As categorias que usaremos aqui foram propostas em 2006 por Meadows, e foram utilizadas em um artigo de revisão de 2017 (SCHWIETERMAN et al, 2018a). São propostas três categorias principais: *gaseous* (gasosas), *surface* (de superfície) e *temporal* (temporais). Existem outras que não estão nestas classificações, como a atmosfera em desequilíbrio químico, que não será discutida neste trabalho. Também estão sendo realizados estudos sobre as chamadas “bioassinaturas agnósticas”, que não consideram a vida terrestre como base. Estas bioassinaturas seriam resultado de organismos com uma composição química completamente diferente das que conhecemos hoje.

Devido às distâncias dos objetos de estudo, o principal método para a detecção de bioassinaturas é a espectroscopia astronômica, que resulta no espectro da interação de radiação eletromagnética com o objeto em questão (SCHWIETERMAN et al, 2018c). Isto também influencia no tipo de dados que atualmente temos condições de detectar. A espectroscopia realizada remotamente não permite a detecção de bioassinaturas de superfície e da grande maioria das temporais. Também ainda não se tem uma maneira de obter o espectro completo de um exoplaneta (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

## 2.5 BIOASSINATURAS GASOSAS

Produtos diretos de reações metabólicas e compostos secundários resultantes de ações externas sobre produtos biogênicos são chamados bioassinaturas gasosas. A confirmação destas substâncias como tendo origem biológica depende do contexto planetário onde está inserido, uma vez que muitos destes elementos também podem ser gerados por processos não-biológicos (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

Uma das principais dificuldades na detecção de bioassinaturas gasosas é o fato de que muitos destes gases possuem sua faixa de maior absorção muito próximas ou iguais entre si, mostrando-se uma necessidade de se obter estes dados com um instrumento da maior resolução possível (SCHWIETERMAN et al, 2018a). Estes compostos possuem maior significância se detectados juntos, ou em um sistema de desequilíbrio (estado onde dois ou mais compostos que normalmente reagiriam entre si por completo e desapareceriam são detectados juntos, indicando que há uma constante produção de ambos) (SCHWIETERMAN et al, 2018b).

Esta revisão considera apenas os compostos que estejam, ou já estiveram, em concentrações grandes o suficiente para serem detectadas espectralmente e que não possam ser formados por processos abióticos comuns, como  $H_2O$  e  $CO_2$  (SCHWIETERMAN et al, 2018a). Considera-se também apenas atmosferas similares à da Terra. Esta categoria considera atmosferas com dominância  $N_2$ ,  $H_2O$  e  $CO_2$ . Considera-se a atmosfera terrestre em todos os seus estágios da formação da Terra. Esta categoria inclui uma grande variedade de compostos, como compostos sulfurosos e a “névoa orgânica”, porém nesta revisão discutiremos em maiores detalhes apenas os quatro compostos considerados principais por Schwieterman (2018b) e Schwieterman (2018c).

### 2.5.1 Oxigênio

Oxigênio é o principal sinal de vida da atmosfera terrestre atual. Conforme estudos na área, é considerado por astrobiólogos como a bioassinatura mais confiável até agora. A presença de altas concentrações de oxigênio em uma determinada atmosfera indica a ocorrência de fotossíntese, um processo biológico (SCHWIETERMAN et al, 2018a). No entanto, estas altas concentrações de oxigênio não estiveram presentes durante a maior parte da história da Terra. O Grande Evento de Oxigenação ocorreu apenas durante o Proterozóico, mas só atingiu níveis atuais no início do Fanerozóico. Antes disso a atmosfera continha grandes quantidades de metano, que diminuiu drasticamente com o aumento de O<sub>2</sub> (SACHKOV et al, 2019).

Como bioassinatura, possui poucas origens geológicas e sua manutenção na atmosfera depende do contexto, podendo variar de acordo com o tipo de estrela do sistema e de outros compostos presentes. É um dos casos de bioassinaturas que podem ser detectadas por espectroscopia de trânsito (coleta do espectro durante um trânsito astronômico) nas camadas mais altas da atmosfera, o oposto de compostos que são facilmente degradados por raios UV e são encontrados apenas nas primeiras camadas (MEADOWS et al, 2018).

Em relação a fontes abióticas, o oxigênio é produzido por reações de fotólise envolvendo CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (CLAUDI, 2017) Porém, esta produção não seria capaz de imitar os níveis de origem biológica devido à fotólise de O<sub>2</sub> por raios UV e outros sumidouros. Estudos de modelos descrevem cenários onde a produção de oxigênio de maneira abiótica seria maior, dependendo do tipo de estrela do sistema e de compostos disponíveis (SACHKOV et al, 2019; MEADOWS et al, 2018).

Uma das características mais interessantes do oxigênio como bioassinatura é a sua relação com ozônio, que é formado a partir de reações de fotólise de oxigênio. Dessa forma, a detecção de ozônio na atmosfera implicaria a existência de oxigênio. Outro ponto interessante é que enquanto oxigênio é mais facilmente detectado pelos espectros visível e infravermelho, ozônio é nas faixas UV e infravermelho. Ou seja, complementam-se e podem ser detectados em todos os espectros. Recomenda-se seguir análises de oxigênio com ozônio para diminuir a possibilidade de falsos positivos (SACHKOV et al, 2019).

### 2.5.2 Ozônio

Ozônio ( $O_3$ ) resulta da reação entre moléculas de oxigênio e radiação solar na estratosfera. Assim, a sua detecção em uma atmosfera também implica a ocorrência de oxigênio. A grande vantagem da consideração destes dois compostos em conjunto é que eles possuem faixas complementares de ótima absorção, aumentando as chances de detecção.

Uma vez que sua formação depende da ação de raios UV, é importante notar que seus níveis seriam afetados pelo tipo de estrela de seu respectivo sistema e da sua distância, independente das concentrações de oxigênio disponíveis.

De acordo com Sachkov (2019), análises do espectro UV detectaram ozônio durante metade da história da Terra. No entanto, uma camada significativa de ozônio pode se formar até em baixas concentrações de oxigênio, tornando sua credibilidade como bioassinatura duvidosa. Também possui algumas origens abióticas, que podem chegar a níveis detectáveis em diferentes circunstâncias (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

### 2.5.3 Metano

Metano ( $CH_4$ ) é um composto orgânico que tem origens tanto abióticas quanto biológicas. Na Terra, é um produto residual do metabolismo anaeróbico metanogênese e também da ação humana, tendo algumas origens não biológicas. Deve ser produzido a uma certa quantidade e/ou frequência para evitar ser completamente degradado por radiação UV ou sofrer oxidação por outros compostos (ESA, 2021a; SCHWIETERMAN et al, 2018a)

A principal origem biológica de metano para a astrobiologia é por microorganismos metanogênicos, sejam eles atuais ou extintos. O metano produzido por um organismo extinto pode ficar armazenado em, por exemplo, uma camada de gelo e ser liberado com mudanças na atmosfera e/ou temperatura. Como bioassinatura, o metano possui uma credibilidade maior quando detectado em conjunto com gases oxidantes como  $O_2$  ou  $O_3$ , uma vez que isso indica que há uma produção grande e/ou frequente o suficiente para que o metano continue sendo detectado e não se oxide por completo.

Em relação a isso, o metano tende a permanecer detectável por um período maior de tempo em condições anóxicas (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

Metano é uma bioassinatura importante para planetas análogos à Terra jovem, quando era produzido por microrganismos metanogênicos em quantidades significativamente maiores que as atuais. Nestas concentrações, CH<sub>4</sub> seria facilmente detectado. No entanto, é importante lembrar que a ausência de O<sub>2</sub> neste período faz com que o metano permaneça por um tempo maior na atmosfera sem sofrer oxidação (CLAUDI, 2017).

Um dos principais problemas do metano como bioassinatura é a abundância de possíveis origens abióticas, mesmo que na Terra a maior parte do CH<sub>4</sub> nela encontrado possui origem biológica. O Metano pode, por exemplo, ser produzido por serpentinização, reações de resquícios orgânicos de asteroides com raios UV e por atividades vulcânicas. Estima-se também que o metano seja um elemento comum na criação de astros em regiões além da *frost line*, ponto que marca a distância orbital de determinada estrela na qual as temperaturas permitem a condensação de compostos de hidrogênio (ESA, 2021a).

Em relação ao vulcanismo, Wogan et al (2020) propõe, por meio de um modelo, que esta produção de CH<sub>4</sub> não chegaria a concentrações detectáveis como as de origem biológica. Além disso, produção de metano por atividades vulcânicas também resultaria em CO, aumentando a confiabilidade de metano como bioassinatura.

Outra dificuldade se apresenta em relação a facilidade de detecção por espectroscopia astronômica. A sua faixa de maior absorção, entre 7-8µm, é a mesma de outros compostos como H<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>O, sendo necessária a utilização de equipamentos mais sensíveis (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

Metano é considerado principalmente como uma possível bioassinatura do planeta Marte. Mesmo com condições extremas e impróprias à vida, pesquisadores ainda consideram a possibilidade de que exista vida no planeta vermelho (ver seção 2.9.1).

#### 2.5.4 Óxido Nitroso

Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) é um composto produzido principalmente pela reação de desnitrificação incompleta, ao gerar N<sub>2</sub> a partir de nitrato. Como bioassinatura, possui poucas origens abióticas e poderia ser facilmente identificado (CLAUDI, 2017).

É considerado uma potencial bioassinatura de planetas análogos à Terra primitiva. Durante o éon Proterozóico, oceanos com altas concentrações de  $\text{H}_2\text{S}$  teriam dificultado a desnitrificação completa, causando um acúmulo de óxido nitroso biogênico.

Suas origens abióticas são pequenas e pouco prováveis. Uma delas, a quimiodesnitrificação, gera  $\text{N}_2\text{O}$  a partir de oxigênio proveniente de fotossíntese. Ou seja, a produção abiótica de  $\text{N}_2\text{O}$  ainda indica atividades biológicas. No geral, e como já mencionado muitas vezes neste trabalho, a viabilidade de  $\text{N}_2\text{O}$  como bioassinatura depende do contexto onde se encontra. A estrela central, assim como outros elementos presentes, são essenciais para determinar se existe a possibilidade de ocorrer desnitrificação (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

Em relação a faixas de absorção,  $7,8\mu\text{m}$ ,  $8,5\mu\text{m}$  e  $17\mu\text{m}$  são as faixas ótimas. No entanto, outros compostos como metano e  $\text{CO}_2$  também absorvem nestas faixas, necessitando instrumentos com melhor resolução para detectar somente  $\text{N}_2\text{O}$ .

## 2.6 BIOASSINATURAS DE SUPERFÍCIE

Esta categoria de bioassinaturas diz respeito a determinadas mudanças detectadas no espectro da própria superfície de um astro que indiquem vida, como pigmentos fotossintetizantes e não fotossintetizantes. Mesmo sendo algo ligado a fotossíntese, um processo biológico, também existem processos abióticos que produzem resultados similares. A detecção de algo com esta complexidade requer maiores estudos, uma vez que estes espectros podem sofrer leves alterações de acordo com as moléculas envolvidas, ambiente, diferentes espécies, entre outras. Ou seja, não há um espectro específico que possa ser utilizado como “impressão digital” (SCHWIETERMAN et al, 2018a; SCHWIETERMAN et al, 2018c).

A mais promissora entre as bioassinaturas de superfície, ou pelo menos a mais estudada, é a banda *red edge* da vegetação. Este fenômeno descreve o espectro característico apresentado por organismos que realizam fotossíntese oxigênica, no qual pigmentos como a clorofila absorvem a maior parte das faixas de luz visível e a estrutura celular causa uma reflexão das faixas do infravermelho. É um exemplo de bioassinatura considerada como facilmente detectável, pois se detectado provavelmente estará cobrindo largas áreas do astro em questão. Esta característica

em seres fotossintetizantes marinhos é fraca demais para ser detectada. No entanto, é importante notar que superfícies de certos minerais (com enxofre, por exemplo) também podem produzir um efeito similar, podendo então apresentar falsos positivos (SCHWIETERMAN et al, 2018b; CLAUDI, 2017; SCHWIETERMAN et al, 2018C).

## 2.7 BIOASSINATURAS TEMPORAIS

Bioassinaturas temporais são mudanças mensuráveis durante um determinado período de tempo que podem indicar atividades de origem biológica. Ou seja, esta categoria analisa interações entre elementos das duas categorias anteriores. Exemplos incluem a variação de CO<sub>2</sub> conforme os ciclos de vegetação nas diferentes estações do ano no hemisfério norte, e as mudanças de concentrações de determinados elementos na atmosfera em diferentes períodos geológicos (SCHWIETERMAN et al, 2018b).

Observações de bioassinaturas temporais devem levar em consideração a região que está sendo estudada, uma vez que não é algo que necessariamente aconteceria em todas as áreas do astro. É a menos estudada dentre as categorias, uma vez que depende de uma enorme quantidade de variáveis e, assim, torna-se difícil produzir um modelo viável (SCHWIETERMAN et al, 2018a).

Tanto as bioassinaturas temporais quanto as de superfície têm uma maior probabilidade de serem observadas em astros com biosferas fotossintetizantes ativas, e necessitam de instrumentos observacionais com uma sensibilidade maior do que para a análise de bioassinaturas gasosas (CLAUDI, 2017).

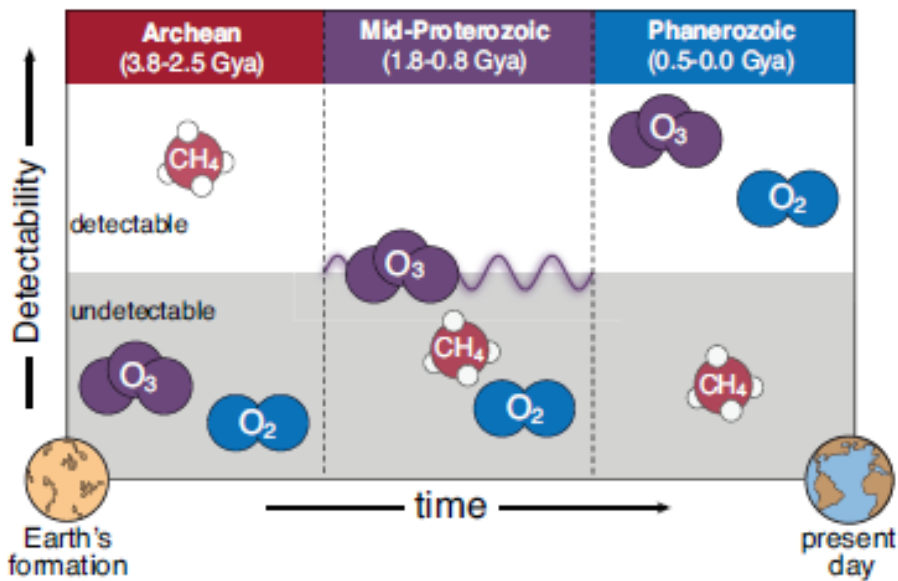
## 2.8 A EVOLUÇÃO DA ATMOSFERA TERRESTRE

A Terra é o único corpo celeste no qual a existência de vida é confirmada e, portanto, a base dos estudos de astrobiologia. No entanto, a presença de vida na Terra não teria como ser detectada remotamente por aproximadamente  $\frac{3}{4}$  da história terrestre (PALLÉ, 2018). Dessa forma, conclui-se que todas as características que a Terra apresentou em todos os seus períodos geológicos devem ser consideradas como possíveis indicadores de um potencial de vida.

Durante o éon Arqueano, uma grande quantidade de metano promovia uma névoa alaranjada de hidrocarbonetos na atmosfera, fazendo destes dois elementos bioassinaturas para este período (SCHWIETERMAN et al, 2018b). O campo magnético terrestre se instalou, impedindo que a atmosfera se dissipasse no espaço, e houve grande proliferação de bactérias fotossintetizantes (PALLÉ, 2018).

Já no Fanerozóico, as principais bioassinaturas são oxigênio e ozônio. O aumento na concentração de oxigênio iniciou-se no Proterozóico, podendo então apresentar níveis detectáveis de ozônio (SCHWIETERMAN et al, 2018b; PALLÉ, 2018). Outras bioassinaturas possíveis incluem gases com enxofre e hidrocarbonetos (SCHWIETERMAN et al, 2018c). Como mencionado na seção 2.5.4, óxido nitroso também pode ser considerado como uma bioassinatura do Proterozóico.

FIGURA 1 - DETECTABILIDADE DE OXIGÊNIO, OZÔNIO E METANO DURANTE OS PERÍODOS DA TERRA



FONTE: Schwieterman 2018b

LEGENDA: representação da detectabilidade de ozônio (bolas roxas), oxigênio (bolas azuis) e metano (bolas vermelhas) durante os éons Arqueano (vermelho), meio do Proterozóico (roxo) e Fanerozóico (azul) nos espectros UV, visível e ambos os infravermelhos. A faixa cinza mostra os elementos não detectáveis e a faixa branca os detectáveis.



## 2.9 FOCOS DE INTERESSE NO SISTEMA SOLAR

A Terra é única dentre os planetas de nosso sistema. São diversas as características que, quando atuam em conjunto, permitem a manutenção da vida.

A descoberta de novos planetas abre exponencialmente nossas possibilidades de encontrar vida em algum deles, mas também é considerada a possibilidade de que astros do Sistema Solar sejam habitáveis.

### 2.9.1 Marte

Outro ponto de interesse é a análise da possibilidade da existência de vida no passado de determinados astros, mesmo que atualmente apresentem condições extremas que não a suportem. Os dois planetas mais próximos da Terra, Marte e Vênus, são de particular interesse.

Marte, o planeta vermelho, é o quarto planeta mais distante do Sol. É também o mais explorado entre os planetas do Sistema Solar, com grande foco em buscar sinais de vida tanto atuais quanto de seres extintos. Considerando as condições extremas do planeta, as possibilidades de se encontrar vida atual são pequenas.

Existem indicações que Marte pode ter sido habitável no passado. Cientistas da Agência Espacial Europeia teorizam que entre 4,1 e 3,7 bilhões de anos atrás Marte possuía uma atmosfera que, juntamente com intensas atividades vulcânicas, permitiu que o planeta se aquecesse o suficiente para formar nuvens e chuva e, assim, um ambiente favorável ao desenvolvimento de vida (ESA, 2021b). Atualmente, Marte não possui mais o campo magnético que protegia sua atmosfera, tornando-a rarefeita demais para manter uma temperatura que permita a existência de água líquida, que hoje se encontra principalmente congelada nas regiões polares (NASA, 2021c). Mesmo assim, as interações passadas entre água e solo podem ter permitido a liberação de nutrientes e, conseqüentemente, de vida (YUNG et al, 2018).

A bioassinatura mais promissora de Marte é o metano. Na atmosfera atual do planeta estima-se que dure entre 300 e 600 anos, um tempo relativamente curto (ESA, 2021a).

Na Terra, metano pode ser gerado biologicamente ou por vias abióticas. Ambas também podem ocorrer em Marte. Considera-se a possibilidade que este metano seja

produzido por microorganismos metanogênicos que vivem ou viveram abaixo da camada de *permafrost* de Marte. Ou seja, podem existir seres que produzem este metano atualmente ou que agora estão extintos, deixando assim o composto congelado na superfície que agora está sendo liberado conforme ocorrem mudanças de temperatura (ESA, 2021a). De acordo com Seto et al (2019), CH<sub>4</sub> de origem biológica é possível, porém as condições ambientais extremas e a raridade de certos ingredientes poderiam impedir que seres metanogênicos se multiplicassem a ponto de produzir metano a níveis detectáveis.

Metano também pode ser gerado por processos geológicos, como oxidação de ferro e atividades vulcânicas. Em Marte, pode ser que ocorra por serpentinização, um processo metamórfico que envolve o mineral olivina e dióxido de carbono e pode resultar em metano em determinadas circunstâncias. Estes elementos envolvidos estão presentes em Marte atualmente, e este processo indicaria a presença de atividades hidrotérmicas no planeta (ESA, 2021a).

### 2.9.2 Vênus

Outro planeta do Sistema Solar nesta linha de estudo é Vênus. Suas condições ambientais são ainda mais extremas do que as observadas em Marte, havendo pouquíssimas possibilidades viáveis de vida atual (a principal teoria discute a possibilidade de existir áreas habitáveis acima de nuvens). Possui aproximadamente o mesmo tamanho e massa da Terra, com nuvens de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e água e uma densa atmosfera composta principalmente de CO<sub>2</sub> que resulta em uma pressão de 9,2 MPa e temperaturas que chegam a 480°C na superfície. Em consequência dessas características, o fenômeno do efeito estufa em Vênus é consideravelmente mais "poderoso" que o terrestre, concentrando muito mais calor na superfície (ARNEY e KANE, 2020; NASA, 2021d).

Uma das características mais importantes de Vênus é a sua potencial perda de habitabilidade. Estima-se que esta potencial habitabilidade de Vênus tenha se perdido ao longo dos anos, possivelmente devido ao envelhecimento e consequente aumento de luminosidade do Sol. Assim, este possível maior calor causado pelo Sol resultaria em um aumento nas taxas de evaporação de água, aumentando também a ação do efeito estufa no planeta, aumentando as temperaturas e assim por diante. Seria então

um modelo do que pode vir a ocorrer a um planeta com o aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e do aumento das temperaturas, demonstrando assim que habitabilidade não é estática (ARNEY e KANE 2020).

Em setembro de 2020, astrônomos britânicos publicaram um artigo na revista *Nature* afirmando terem detectado fosfina, possivelmente de origem biológica, na atmosfera de Vênus. Isto seria uma possível bioassinatura para o planeta, porém novos dados indicam que houve um erro, e o que realmente estava sendo detectado era dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), um composto abundante na atmosfera de Vênus que não é considerado como possível bioassinatura (UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2021).

### 2.9.3 *Ocean Worlds*

*Ocean Worlds* são corpos celestes com oceanos líquidos (HENDRIX et al, 2019). Assim, o interesse vem do fato de que a vida como nós a conhecemos depende de água líquida.

Esta categoria inclui astros com uma grande variedade de características, e uma igual variedade de níveis de possibilidade da existência de vida. Consideram-se nesta categoria tanto os astros com oceanos confirmados (Europa, Titã, Enceladus, Ganimedes e Calisto) quanto os que são apenas especulação (Plutão, Tritão, Ceres, etc).

Analisaremos aqui em maiores detalhes dois destes, Europa e Titã.

#### 2.9.3.1 Europa

Europa é uma das 79 luas até hoje descobertas orbitando o planeta Júpiter. É considerada por astrobiólogos um dos astros mais promissores quando se trata da busca por vida extraterrestre. Sua superfície é coberta por uma camada de gelo (estima-se entre 15 e 25 km de profundidade) com longas fraturas e manchas escuras de composição desconhecida, acima de um oceano líquido (estima-se entre 60 e 150 km de profundidade). Abaixo do oceano, considera-se a presença de uma camada rochosa (NASA, 2021e).

A sonda espacial Galileo, lançada em 1989 pela NASA e que orbitou Júpiter e suas luas durante anos, é a principal fonte de informações que temos sobre Europa (NASA, 2021f).

Pesquisadores estimam que Europa possui a presença de elementos comumente associados com vida, como carbono e hidrogênio, desde sua formação. Análises do comportamento do campo magnético de Júpiter ao redor de Europa indicam a presença de um oceano de água salgada abaixo da sua superfície externa de gelo, que cobre toda a extensão do corpo (NASA, 2021e; NASA, 2021f). Este mesmo campo pode ser responsável pela produção de calor por meio do processo de aquecimento de marés, e o planeta também bombardeia Europa com radiação. Juntamente com as interações entre o fundo rochoso e a água do oceano, é possível considerar a possibilidade de atividades geológicas, hidrotérmicas e até vulcânicas que permitissem a existência de vida nestas áreas (NASA, 2021g).

Outro ponto de interesse é a facilidade de análise, já que uma sonda poderia coletar dados enquanto em órbita. Em 2013, dados coletados pelo Telescópio Hubble indicaram que a lua pudesse estar ativamente ejetando vapor (possivelmente de água) no espaço. Confirmação deste fato poderia, além de permitir a coleta de amostras para análise de uma missão em órbita, indicar atividade geológica em Europa (NASA, 2021e; NASA, 2021h).

Assim, Europa poderia apresentar os três principais requerimentos para vida mencionados na seção 2.2: uma fonte de energia, um solvente líquido e a presença de nutrientes para a formação de enzimas e de biomassa. Estas teorias são os principais pontos de estudo da missão Europa Clipper (ver seção 2.11).

### 2.9.3.2 Titã

Titã, a maior lua do planeta Saturno, é envolta por uma espessa atmosfera de nitrogênio e metano. Sua camada mais externa é formada por água em forma de gelo, e suspeita-se que abaixo dela exista um oceano de água salgada líquida (NASA, 2021i).

Titã é o único astro do Sistema Solar que apresenta um ciclo rotativo de líquidos similar ao ciclo da água terrestre, mas com diferentes elementos envolvidos. As temperaturas em Titã chegam a  $-179^{\circ}\text{C}$ , possibilitando a existência de metano e etano

líquido. Estes dois compostos líquidos formam lagos e rios na camada externa de água congelada. Sua superfície apresenta poucas crateras de impacto por outros objetos celestes, indicando uma maior atividade geológica, e podem-se observar formações similares a dunas compostas por grãos de hidrocarbonetos. Outro ponto de interesse é que, ao interagir com a luz ultravioleta, as moléculas de metano e etano formam outros elementos relevantes como nitrogênio e oxigênio (NASA, 2021i).

Dessa forma, Titã é considerado como um potencial local habitável. Não se sabe ainda a origem do metano em sua superfície, uma vez que continua detectável em grandes quantidades apesar de sua degradação por raios UV. O principal ponto de interesse para a busca por vida é o oceano interno, mas o ciclo de metano líquido apresenta uma possibilidade interessante. Ao analisar os três critérios para vida, Titã possui nutrientes (hidrocarbonetos, nitrogênio, entre outros) e uma fonte de energia. Uma forma de vida que utilizasse metano líquido como solvente ao invés de água, e fosse capaz de aguentar as temperaturas extremas, poderia sobreviver na superfície desta lua (NASA, 2021i).

## 2.10 EXOPLANETAS

Exoplanetas, em sua definição mais básica, são planetas que orbitam outras estrelas além do Sol. O primeiro exoplaneta foi descoberto há 28 anos, em 1992, pelos astrônomos Aleksander Wolszczan e Dale Frail. Até agora, cerca de 4.455 exoplanetas já foram identificados e especula-se que cada estrela na Via Láctea possui pelo menos um planeta em sua órbita (NASA, 2021a).

Ainda não temos instrumentos avançados o suficiente para caracterizar estes planetas. O máximo que conseguimos fazer é detectar sua presença e definir algumas características gerais. Existem 4 categorias nas quais dividimos exoplanetas, em geral em relação a seu tamanho: super-Terra (*super-Earth*), gigante gasoso (*gas giant*), netuniano (*neptunian*) e terrestre (*terrestrial*).

As super-Terras são o tipo de exoplanetas com mais exemplares detectados, e também os mais promissores para a busca por vida. São caracterizadas por serem maiores que a Terra e menores que Netuno e podem ser planetas gasosos, rochosos ou ambos. Apesar do nome, esses exoplanetas podem ou não ter características similares às do nosso planeta. Assim, existem exoplanetas com características muito

diferentes de qualquer astro que conhecemos no Sistema Solar, abrindo então uma enorme quantidade de possibilidades para a astrobiologia (NASA, 2021j; CLAUDI, 2017).

Netunianos são planetas gasosos de tamanho similar a Netuno ou Urano. Não muito se sabe de suas composições, uma vez que suas atmosferas apresentam camadas densas de nuvens que bloqueiam a luz e impedem análises espectrais remotas. Espera-se que o Telescópio Espacial James Webb possibilite análises mais detalhadas (NASA, 2021k).

Gigantes gasosos são planetas compostos de hélio e hidrogênio, de tamanhos similares a Júpiter ou Saturno ou até muito maiores que isso. São caracterizados por não possuírem superfícies rochosas, e sim apenas de gás. Também podem ser encontrados em órbitas muito próximas de suas estrelas, algo não observado no Sistema Solar (NASA, 2021l).

A última categoria, os terrestres, são planetas rochosos de tamanho similar ou menores que a Terra. Exemplos destes incluem os 7 exoplanetas localizados na zona habitável do sistema da estrela TRAPPIST-1, descobertos em 2017 (NASA, 2021m). O exoplaneta mais próximo da Terra orbita a estrela Próxima Centauri. O Próxima Centauri b, como é chamado, é do tipo super-Terra e está a aproximadamente 4 anos-luz de distância (NASA, 2021n). As próximas missões espaciais estão especialmente programadas para o estudo de exoplanetas.

## 2.11 NOVOS HORIZONTES

Estudos em astrobiologia estão sendo regularmente realizados por agências espaciais de diversos países. A NASA, a ESA (Agência Espacial Europeia), a CNSA (Agência Espacial Nacional Chinesa) e a Roscosmos (Agência Espacial Russa) são alguns exemplos.

As pesquisas realizadas por cientistas vinculados a universidades também são de suma importância. Exemplos incluem a Universidade de Illinois Urbana-Champaign e a Universidade de Edimburgo. No Brasil, a área ainda está no começo, mas o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP) possui um Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia.

Ainda existem muitas análises que nossos equipamentos atuais não são capazes de realizar. Os dados são, na grande maioria das vezes, coletados de forma remota. Só é possível conseguir dados mais precisos, como imagens e análises de solo, com missões espaciais específicas que necessitam de muito dinheiro e tempo. As análises de exoplanetas são ainda mais difíceis, com apenas a detecção de sua existência sendo possível no momento. Nesta seção, apresentaremos algumas das missões planejadas para as próximas décadas que prometem avançar neste quesito.

O lançamento mais próximo é do Telescópio Espacial James Webb (JWST), previsto para 2021. Projetado por uma colaboração entre a NASA, a ESA e a CSA (Agência Espacial Canadense), complementarás observações feitas pelo Telescópio Espacial Hubble. O JWST possui uma sensibilidade maior do espectro infravermelho e de fotografia direta, permitindo pela primeira vez a análise de atmosferas de exoplanetas (CLAUDI, 2017). Também possibilitará imagens diretas, mas não próximas ou detalhadas, de exoplanetas. Maiores detalhes serão obtidos apenas de astros do próprio Sistema Solar (NASA, 2021o). Outros de seus objetivos incluem estudar o ciclo de vida de estrelas e galáxias (NASA, 2021p). Dentre as bioassinaturas discutidas anteriormente, os instrumentos do JWST teriam uma maior probabilidade de detectar metano em atmosferas similares à da jovem Terra, antes dos altos níveis de oxigênio. Mesmo possuindo essas capacidades, não é garantido que o James Webb seja capaz de detectar sinais de vida mesmo que eles estejam presentes. Será a primeira tentativa, mas existem outros projetos mais avançados sendo desenvolvidos.

O LUVOIR (Large UV Optical Infrared Surveyor) ainda não tem data de lançamento, mas foi projetado para o final da década de 2030. Formado por dois telescópios separados (LUVOIR A e B), este projeto terá mais sensibilidade e resolução para estudar exoplanetas distantes. Um de seus instrumentos, o ECLIPS, filtrará luz estelar e nos permitirá imagens e caracterizações diretas de exoplanetas, não importando o quão próximo este esteja de sua estrela. Por meio de espectroscopia, poderá descrever em detalhes atmosferas e até superfícies de uma grande quantidade de exoplanetas de diversos tipos a distâncias de até 25 parsecs e de astros do próprio Sistema Solar (NASA, 2021q). Terá a capacidade de detectar importantes bioassinaturas gasosas, como oxigênio e ozônio (SCHWIETERMAN, 2018b). Será uma adição indispensável para a busca por sinais de vida extraterrestre.

Um telescópio espacial com um espelho menor que o do LUVOIR, com um foco nos exoplanetas mais próximos, é o HabEx, ou Habitable Exoplanet Observatory (SCHWIETERMAN, 2018b). Como ele, o HabEx terá como objetivo a busca e análise de exoplanetas, em especial os com maior potencial para a existência de vida, e instrumentos de imagens diretas e espectroscópios. Também está planejado para a década de 2030 e é coordenado pela NASA. O relatório oficial do HabEx indica sua capacidade de detectar e analisar concentrações de bioassinaturas, comparando-as entre si. Vapor de água, oxigênio e ozônio poderão ser detectados em concentrações de até 1% da atmosfera terrestre atual (NASA, 2021r).

Há também as missões planejadas para estudarem astros específicos. O recente Mars2020 e o ExoMars enviaram dados a partir da superfície de Marte, o Europa Clipper coletará dados de Europa, o Dragonfly de Titã, o JUICE terá como objetivo principal Júpiter e três de suas luas (Europa, Calisto e Ganimedes), entre outras.

O ExoMars é um programa conjunto da Agência Espacial Européia (ESA) e da Agência Espacial Russa (Roscosmos) cujos principais objetivos incluem buscar evidências de vida em Marte em algum momento da história do planeta e analisar sua composição atmosférica (ESA, 2021c; ESA, 2021a). Ele possui duas etapas: a primeira, o Trace Gas Orbiter ou TGO, foi lançada em 2016 e a segunda, que consiste do rover e de uma plataforma de superfície, que está marcada para 2022. O TGO busca bioassinaturas na atmosfera e suas origens, enquanto a de 2022 realizará estudos do solo em diversas profundidades. Um dos principais pontos de interesse é a confirmação da existência de metano (ESA, 2021a).

O Europa Clipper, desenvolvido pela NASA, tem como objetivo principal realizar uma análise detalhada de Europa, buscando confirmar as suspeitas mencionadas na seção 2.9.3.1. Terá uma variedade de instrumentos com uma maior resolução do que as missões anteriores, sendo capaz de capturar imagens, espectros, estrutura geológica, entre outros dados. Assim, poderá comprovar a existência de um oceano, sua profundidade e salinidade, além da composição química das diferentes camadas, especialmente das “manchas” avermelhadas observadas na superfície. Outro instrumento interessante é um radar que fisicamente penetrará a superfície de gelo de Europa. Não terá instrumentos específicos para a busca por vida, mas buscará determinar se existem condições favoráveis como se suspeita (NASA, 2021s; NASA, 2021f). Tem o lançamento previsto para a metade da década de 2020 (NASA, 2021t).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As pesquisas para a revisão bibliográfica foram realizadas utilizando a ferramenta Google Scholar. Com exceção dos trabalhos utilizados para conceitos básicos (Cockell 2016), foram selecionados apenas trabalhos publicados a partir de 2017. A área de astrobiologia é caracterizada por rápidos avanços científicos e tecnológicos, portanto foi dada prioridade para trabalhos mais recentes (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2019). Foi feita uma revisão narrativa da literatura, não sendo esta uma revisão exaustiva do tema. O único critério aplicado foi o de ano de publicação, não tendo sido feita uma busca rigidamente controlada ou uma análise de natureza crítica. As informações colocadas neste trabalho foram sujeitas ao julgamento da própria autora se eram relevantes ou não. As pesquisas foram feitas utilizando palavras-chave como mostra o quadro abaixo.

QUADRO 1 - DIVISÃO DE ARTIGOS POR PALAVRA-CHAVE DA BUSCA

Palavras-chave	Trabalhos
Astrobiology	An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe;
Biosignatures astrobiology	Exoplanet Biosignatures: Understanding Oxygen as a Biosignature in the Context of Its Environment; Exoplanet Biosignatures: Future Directions Exoplanet Biosignatures: A Review of Surface and Temporal Biosignatures The Detectability of Earth's Biosignatures Across Time Remotely Detectable Signs of Life

exoplanet biosignature	Signs of life on a global scale: Earth as a laboratory for exoplanet biosignatures
oxygen biosignature	Exoplanets: Possible Biosignatures Exoplanet Habitability: Potential O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> Biosignatures in the Ultraviolet. Abundant Atmospheric Methane from Volcanism on Terrestrial Planets Is Unlikely and Strengthens the Case for Methane as a Biosignature.
methane astrobiology	Potential for Aerobic Methanotrophic Metabolism on Mars Methane on Mars and Habitability: Challenges and Responses
venus biosignatures	Venus as an analog for hot Earths
ocean worlds	The NASA Roadmap to Ocean Worlds

Detalhes não encontrados nos artigos referenciados acima foram retirados do site da NASA, e no caso das missões espaciais as pesquisas foram feitas nos seus respectivos sites.

Para a redação dos podcasts, os tópicos foram adaptados da revisão bibliográfica deste trabalho, agrupados de acordo com temas similares. Os episódios terão duração de aproximadamente 3 a 5 minutos. A linguagem foi adaptada para ser mais coloquial. O público-alvo consiste de estudantes a partir de 15 anos (ensino médio e universitários), e serão disponibilizados em plataformas de divulgação de podcasts, tal como Spotify.

## 4 ROTEIROS DOS PODCASTS

### 4.1 EPISÓDIO 1 - INTRODUÇÃO E HISTÓRICO

A Astrobiologia é definida como a área da ciência que estuda a vida no universo. Isto inclui como ela se inicia, como se dá sua evolução e desenvolvimento, especulações sobre seu futuro, e sua distribuição pelo universo. É uma ciência fundamentalmente interdisciplinar, incluindo áreas como astronomia, biologia e geologia.

A história da astrobiologia está interligada com a história da exploração espacial como um todo. Em 1957, ocorreu o lançamento do primeiro satélite juntamente com a primeira conferência internacional sobre as origens da vida na Terra. O primeiro projeto de astrobiologia da NASA, que antes era chamada exobiologia, foi criado em 1959, apenas um ano depois da fundação do Comitê de Pesquisa Espacial, COSPAR, e da própria NASA, cujo Programa de Exobiologia veio no ano seguinte. O Instituto de Astrobiologia da NASA, NAI, foi criado em 1998. Este instituto é responsável pela publicação dos documentos norteadores da pesquisa em astrobiologia, os *NASA Astrobiology Roadmaps*. Estes documentos apresentam uma série de objetivos.

O primeiro *Roadmap* foi publicado em 1998, apresentando três principais questionamentos gerais - "como a vida se inicia e evolui", "existe vida em algum outro local no universo", e "qual é o futuro da vida na Terra e fora dela". Todos os *Roadmaps* possuem estas perguntas como base, mas variam em seus objetivos específicos. Foram feitas novas versões em 2003 e 2008. A mais recente é a de 2015 que, ao contrário das anteriores, apresenta seus objetivos divididos de acordo com específicos temas de pesquisa dentro da astrobiologia.

Desde então, houveram avanços significativos em pesquisas na área. Avanços tecnológicos em missões tipo a Kepler permitiram a detecção de 4.455 exoplanetas na Via Láctea até hoje, assim como indicações de ambientes habitáveis em astros do Sistema Solar. A descrição de atmosferas, principal fonte de informações sobre o potencial biológico de um determinado astro, é o principal foco de missões espaciais nas próximas décadas.

Os estudos em bioassinaturas são feitos com base no que é observado na Terra. Ambientes terrestres que apresentem condições similares ao corpo celeste de

interesse, chamados *planetary field analogues*, podem ser utilizados como substitutos mais acessíveis. Dessa forma, astrobiólogos podem estudar organismos que vivem nestas condições e quais seriam as suas bioassinaturas detectáveis. Desertos, por exemplo, são utilizados como campo de testes para missões de superfície em planetas com condições similares, como Marte, e estudos astrobiológicos são realizados em locais onde organismos vivem em condições extremas, como fontes hidrotermais. Algumas condições também podem ser simuladas em laboratório.

#### 4.2 EPISÓDIO 2 - REQUERIMENTOS PARA A VIDA, DEFINIÇÃO DE HABITABILIDADE E A EVOLUÇÃO DA ATMOSFERA TERRESTRE

OK, então você quer identificar se vida existe em um planeta tal. Mas primeiro, o que é vida? Como classificar pelo que procuramos? Você já deve ter ouvido falar da definição de 'ser vivo', que é formado por células, material genético, etc. Mas a busca por vida extraterrestre ainda não chegou neste ponto, sendo melhor colocada uma definição do que em um ambiente permitiria a realização de reações metabólicas e, assim, a existência de vida. Assim, consideram-se três critérios básicos: uma fonte de energia, um solvente líquido e a presença de nutrientes para a formação de enzimas e de biomassa. É importante manter a mente aberta, e não só considerar as características da vida terrestre, com base em carbono e uso de água líquida como solvente.

Tendo esta base, o próximo passo é determinar a habitabilidade do astro. Afinal, não adianta nada ter os critérios para a existência de vida em um ambiente incapaz de sustentá-la. Mas o que torna um planeta habitável?

'Habitabilidade' é a capacidade que um certo ambiente tem de sustentar o funcionamento de qualquer organismo vivo por um período de tempo. É algo que depende de muitas variáveis, como a composição do astro e a sua distância de sua estrela.

A distância entre o astro em questão e sua estrela determina a chamada "zona habitável", que indica a região orbital na qual a distância entre o astro e sua estrela permite a existência de água em estado líquido em sua superfície. Isto varia de acordo com o tipo de estrela, já que estrelas com menor luminosidade possuem zonas habitáveis mais próximas de si, e vice-versa. Mas a zona habitável é um conceito

falho, pois mesmo astros fora dela ainda podem possuir água líquida, só abaixo de sua superfície. Plutão, Europa e Enceladus são todos exemplos que podem possuir oceanos de água líquida internos e habitáveis.

Habitabilidade também depende de características mais diretas dos astros em si. Planetas rochosos com atmosferas muito densas e temperaturas muito altas, como Vênus, também não promovem ambientes habitáveis.

Também considera-se a possibilidade de um ambiente habitável tornar-se inabitável, ou vice versa, por meio de ações internas e externas do planeta. E depois de tudo isso, ainda é necessário lembrar que a existência de condições favoráveis ao desenvolvimento de seres vivos também significa que isto definitivamente tenha ocorrido. Para isto, são consideradas as chamadas bioassinaturas, que serão discutidas nos próximos episódios.

A Terra é o único corpo celeste no qual a existência de vida é confirmada e, portanto, a base dos estudos de astrobiologia. No entanto, a presença de vida na Terra não teria como ser detectada remotamente por aproximadamente  $\frac{3}{4}$  da história terrestre. Dessa forma, conclui-se que todas as características que a Terra apresentou em todos os seus períodos geológicos devem ser consideradas como possíveis indicadores de um potencial de vida.

Durante o éon Arqueano, uma grande quantidade de metano formava uma névoa alaranjada de hidrocarbonetos na atmosfera, fazendo ambos bioassinaturas para este período. O campo magnético terrestre se instalou, impedindo que a atmosfera se dissipasse no espaço, e houve então uma grande proliferação de bactérias fotossintetizantes.

Já no Fanerozóico, as principais bioassinaturas são oxigênio e ozônio. O aumento na concentração de oxigênio iniciou-se no Proterozóico, podendo então apresentar níveis detectáveis de ozônio. Outras bioassinaturas possíveis incluem gases com enxofre, hidrocarbonetos e óxido nitroso.

#### 4.3 EPISÓDIO 3 - BIOASSINATURAS

O que são bioassinaturas? A definição do primeiro *Astrobiology Roadmap* da NASA é de um elemento (objeto, substância ou padrão) cuja origem seja um agente biológico. Se você não lembra o que são os *Astrobiology Roadmaps*, dá uma passada no nosso

primeiro episódio que a gente te explica. Uma bioassinatura é, então, algo que sinaliza o impacto que processos biológicos têm sobre o ambiente. Na Terra, podemos pensar em coisas como a abundância de oxigênio na atmosfera e a cor verde das suas massas de terra em fotos tiradas do espaço.

As melhores bioassinaturas são geralmente aquelas que atendem a três critérios principais; a confiabilidade, que diz respeito à probabilidade de que a bioassinatura em questão seja realmente um produto de processos biológicos; a capacidade de sobrevivência, que determina a sua capacidade de permanecer detectável em um ambiente e resistir à degradação; e detectabilidade, que indica a sua capacidade de ser detectado pelos métodos atuais, considerando seu comprimento de onda em relação a outros elementos e provável presença diretamente na atmosfera.

Também é importante diminuir ao máximo as chances de falsos negativos e falsos positivos. Assim, as características do ambiente são tão importantes quanto a bioassinatura em si. O oxigênio, por exemplo, só esteve presente na atmosfera em quantidades suficientes para ser remotamente detectado durante o éon Fanerozóico, ou seja, os últimos 500 milhões de anos. Isso pode parecer muito tempo, mas comparado com a idade da Terra de 4,5 bilhões de anos é muito pouco. Portanto, a não detecção de oxigênio na atmosfera é um possível falso negativo muito prevalente. Considerando estas dificuldades, é importante notar que a determinação de uma bioassinatura exoplanetária é sempre considerada como potencial, ou seja, mantendo sempre um pé atrás. A determinação irrefutável de vida provavelmente será apenas quando tivermos fotos diretas como prova.

Vamos dividir as bioassinaturas em três principais categorias: gasosas, de superfície e temporais. Outros tipos existem, como a atmosfera em desequilíbrio químico, e as chamadas 'bioassinaturas agnósticas'. Estas últimas não consideram vida terrestre como base, ou seja, resultariam de organismos com uma composição química completamente diferente das que conhecemos hoje.

Devido às distâncias dos objetos de estudo, o principal método para a detecção de bioassinaturas é a espectroscopia astronômica, que resulta no espectro da interação de radiação eletromagnética com o objeto em questão. Isso resulta em uma "impressão digital", que pode então ser usada para a determinação de composição. Isto também influencia no tipo de dados que atualmente temos condições de detectar. A espectroscopia realizada remotamente não permite a detecção de bioassinaturas

de superfície e da grande maioria das temporais. Também ainda não se tem uma maneira de obter o espectro completo de um exoplaneta, que estão ainda mais longes.

#### 4.4 EPISÓDIO 4 - BIOASSINATURAS GASOSAS, DE SUPERFÍCIE E TEMPORAIS

Como mencionado no episódio anterior, vamos aqui dividir as bioassinaturas em três categorias: gasosas, de superfície e temporais. É importante lembrar que estas não são categorias universalmente aceitas, nem contemplam todas as bioassinaturas existentes.

Bioassinaturas gasosas são descritas como produtos diretos de reações metabólicas e compostos secundários resultantes de ações externas sobre produtos biogênicos. A confirmação destas substâncias como tendo origem biológica depende muito do contexto planetário onde está inserido, uma vez que muitos destes elementos também podem ser gerados por processos não-biológicos. Estes compostos são mais confiáveis como bioassinaturas se detectados juntos, ou em um sistema de desequilíbrio, um estado onde dois ou mais compostos que normalmente reagiriam entre si por completo e desapareceriam são detectados juntos, indicando que há uma constante produção de ambos.

Uma das principais dificuldades na detecção de bioassinaturas gasosas é o fato de que muitos destes gases possuem sua faixa de maior absorção, para gerar sua 'impressão digital', muito próximas ou iguais entre si, mostrando-se uma necessidade de se obter estes dados com um instrumento da maior resolução possível. Vamos considerar apenas os compostos que estejam, ou já estiveram, em concentrações grandes o suficiente para serem detectadas de forma remota e que não possam ser formados por processos abióticos comuns, como  $H_2O$  e  $CO_2$ . Considera-se também apenas atmosferas similares à da Terra, com dominância de  $N_2$ ,  $H_2O$  e  $CO_2$ , em qualquer período da história da Terra. Dentre as três categorias, as bioassinaturas gasosas são as mais estudadas e as mais promissoras. Nos próximos episódios vamos discutir alguns exemplos principais.

As bioassinaturas de superfície determinam mudanças detectadas no espectro da própria superfície de um astro que indiquem vida, como pigmentos, fotossintetizantes ou não. Mesmo sendo algo ligado a fotossíntese, um processo biológico, também existem processos abióticos que produzem resultados similares. A detecção de algo

com esta complexidade requer estudos mais profundos, já que estes espectros podem sofrer leves alterações de acordo com as moléculas envolvidas, ou diferentes ambientes e espécies. Ou seja, não há um espectro específico que possa ser utilizado como "impressão digital".

A mais promissora entre as bioassinaturas de superfície, ou pelo menos a mais estudada, é a banda *red edge* da vegetação. Este fenômeno descreve o espectro característico de organismos que realizam fotossíntese oxigênica, no qual pigmentos como a clorofila absorvem a maior parte das faixas de luz visível ao mesmo tempo que a estrutura celular causa uma reflexão das faixas do infravermelho. É um exemplo de bioassinatura considerada facilmente detectável, pois provavelmente estará cobrindo largas áreas do astro em questão. No entanto, é importante notar que superfícies de certos minerais (com enxofre, por exemplo) também podem produzir um efeito similar, podendo então ser considerado um falso positivo.

A última categoria é a de bioassinaturas temporais, que são mudanças mensuráveis durante um determinado período de tempo que podem indicar atividades de origem biológica. Ou seja, interações entre elementos das duas categorias anteriores. Isto inclui coisas como a variação de CO<sub>2</sub> conforme os ciclos de vegetação nas diferentes estações do ano no hemisfério norte, e as mudanças de concentrações de determinados elementos na atmosfera em diferentes períodos geológicos.

Observações de bioassinaturas temporais dependem drasticamente da região que está sendo estudada, uma vez que não é algo que necessariamente aconteceria em todas as áreas do astro. É a menos estudada dentre as categorias, uma vez que depende de uma enorme quantidade de variáveis e, assim, torna-se difícil produzir um modelo viável.

Tanto as bioassinaturas temporais quanto as de superfície tem uma maior probabilidade de serem observadas em astros com biosferas fotossintetizantes ativas, e necessitam de instrumentos observacionais com uma sensibilidade maior do que para a análise de bioassinaturas gasosas.



#### 4.5 EPISÓDIO 5 - OXIGÊNIO E OZÔNIO

Como a categoria de bioassinaturas gasosas é a mais estudada, ela também é a que mais possui exemplos viáveis. Discutiremos aqui quatro principais, mas saiba que existem outros, como compostos sulfurosos e a chamada "névoa orgânica".

Te darei cinco segundos para pensar em uma bioassinatura da Terra. Valendo (1, 2, 3, 4, 5). Você provavelmente pensou em oxigênio, um gás tão necessário para a sobrevivência de nós humanos. Astrobiólogos consideram o oxigênio como sendo a bioassinatura mais confiável que conhecemos até agora. A presença de altas concentrações de oxigênio em uma determinada atmosfera indica a ocorrência de fotossíntese, um processo biológico. No entanto, estas altas concentrações de oxigênio não estiveram presentes durante a maior parte da história da Terra. O Grande Evento de Oxigenação ocorreu apenas durante o Proterozóico, e o oxigênio só atingiu níveis atuais no início do Fanerozóico. Antes disso a atmosfera continha grandes quantidades de metano, que diminuiu drasticamente com o aumento de  $O_2$ .

Também possui poucas origens geológicas e sua permanência na atmosfera depende do contexto, podendo variar de acordo com o tipo de estrela do sistema e da coexistência com outros compostos. É um dos casos de bioassinaturas que pode ser detectada por espectroscopia de trânsito, que é a coleta do espectro durante um trânsito astronômico, nas camadas mais altas da atmosfera, oposto de compostos que facilmente degradados por raios UV e são encontrados apenas nas camadas mais perto da superfície.

Em relação a fontes abióticas, o oxigênio é produzido por reações de fotólise envolvendo  $CO_2$  e  $H_2O$ . Porém, esta produção não seria capaz de imitar os níveis de origem biológica, sendo destruída por sumidouros como fotólise de  $O_2$  por raios UV. Existem, no entanto, possíveis cenários onde a produção de oxigênio de maneira abiótica seria maior dependendo do tipo de estrela do sistema e de compostos disponíveis.

Uma das características mais interessantes do oxigênio como bioassinatura é a sua relação com ozônio, que é formado a partir de reações de fotólise de oxigênio. Assim, a detecção de ozônio na atmosfera implicaria a existência de oxigênio. Uma grande vantagem da consideração destes dois compostos em conjunto é que eles possuem

faixas complementares de ótima absorção, aumentando as chances de detecção. Oxigênio é mais facilmente detectado pelos espectros visível e infravermelho, enquanto ozônio é nas faixas UV e infravermelho. Ou seja, podem ser detectados em todos os espectros. Assim, recomenda-se seguir análises de oxigênio com ozônio para diminuir a possibilidade de falsos positivos.

Mas é importante lembrar que, uma vez que sua formação depende da ação de raios UV, níveis de ozônio seriam afetados pelo tipo de estrela de seu respectivo sistema e da sua distância a ela, independente das concentrações de oxigênio disponíveis. Ozônio também foi detectável durante metade da história da Terra, mas uma camada significativa de ozônio pode se formar até em baixas concentrações de oxigênio, tornando sua credibilidade como bioassinatura duvidosa. Também possui algumas origens abióticas, que podem chegar a níveis detectáveis em diferentes circunstâncias.

#### 4.6 EPISÓDIO 6 - METANO E ÓXIDO NITROSO

As duas outras principais bioassinaturas gasosas de atmosferas similares à terrestre são metano e óxido nitroso. Metano é um composto orgânico que tem origens tanto abióticas quanto biológicas. Na Terra, é um produto residual do metabolismo anaeróbico metanogênese e também da ação humana, tendo também algumas origens não biológicas. Deve ser produzido a uma certa quantidade ou frequência para evitar ser completamente degradado por radiação UV ou sofrer oxidação por outros compostos.

Para a astrobiologia, a origem biológica de metano mais importante é por microorganismos metanogênicos, sejam eles atuais ou extintos. Mas como assim, vivo ou extinto? O metano produzido por um organismo extinto pode ficar armazenado em, por exemplo, uma camada de gelo e ser liberado com mudanças na atmosfera ou temperatura. Como bioassinatura, o metano possui uma credibilidade maior quando detectado em conjunto com gases oxidantes, como  $O_2$  ou  $O_3$ , pois indica que há uma produção grande ou frequente o suficiente para que o metano não se oxide por completo. Em relação a isso, o metano tende a permanecer detectável por um período maior de tempo em condições anóxicas, ou seja, sem oxigênio.

Metano também é uma bioassinatura importante para planetas análogos à Terra jovem, quando era produzido por microorganismos metanogênicos em quantidades

significativamente maiores que as atuais. Nestas concentrações,  $\text{CH}_4$  seria facilmente detectado. No entanto, é importante lembrar que a ausência de  $\text{O}_2$  neste período fazia com que o metano permaneça por um tempo maior na atmosfera sem sofrer oxidação. Um dos principais problemas do metano como bioassinatura é a abundância de possíveis origens abióticas. Pode, por exemplo, ser produzido pelo processo de serpentinização, algumas reações de resquícios orgânicos de asteroides com raios UV e por atividades vulcânicas. Estima-se também que o metano seja um elemento comum na criação de astros em regiões além da *frost line*, ponto que marca a distância orbital de determinada estrela na qual as temperaturas permitem a condensação de compostos de hidrogênio.

Em relação ao vulcanismo, pode ser que esta produção de  $\text{CH}_4$  não chegaria a concentrações detectáveis como as de origem biológica. Além disso, a produção de metano por atividades vulcânicas também resultaria em  $\text{CO}$ , a ausência do qual aumentaria a confiabilidade de metano como bioassinatura.

Outra dificuldade se apresenta em relação a detecção por espectroscopia astronômica. A sua faixa de maior absorção é a mesma de outros compostos como  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , sendo necessária a utilização de equipamentos mais sensíveis.

Metano é considerado principalmente como uma possível bioassinatura, de seres vivos agora ou no passado, do planeta Marte.

A última bioassinatura gasosa é o óxido nitroso, um composto produzido principalmente pela reação de desnitrificação incompleta. Como bioassinatura, possui poucas origens abióticas e poderia ser facilmente identificado.

É considerado uma potencial bioassinatura de planetas análogos à Terra primitiva. Durante o éon Proterozóico, oceanos com altas concentrações de  $\text{H}_2\text{S}$  teriam dificultado a desnitrificação completa, causando um acúmulo de óxido nitroso biogênico.

Suas origens abióticas são pequenas e pouco prováveis. Uma delas, a quimiodesnitrificação, gera  $\text{N}_2\text{O}$  a partir de oxigênio proveniente de fotossíntese. Ou seja, a produção abiótica de  $\text{N}_2\text{O}$  ainda indica atividades biológicas. No geral, e como já mencionado muitas vezes, a viabilidade de  $\text{N}_2\text{O}$  como bioassinatura depende do contexto onde se encontra. A estrela central, assim como outros elementos presentes, são essenciais para determinar se existe a possibilidade de ocorrer desnitrificação.

Em relação a faixas de absorção, 7,8, 8,5 e 17 são as faixas ótimas. No entanto, outros compostos como metano e CO<sub>2</sub> também absorvem nestas faixas, necessitando instrumentos com melhor resolução para detectar somente N<sub>2</sub>O.

#### 4.7 EPISÓDIO 7 - MARTE E VÊNUS

Dentre os planetas do Sistema Solar, os dois com maior potencial para a astrobiologia são nossos vizinhos mais próximos, Marte e Vênus. Neles, estudamos tanto o potencial de vida atual quanto uma possibilidade da existência de vida no passado de determinados astros, mesmo que atualmente apresentem condições extremas que não a suportam.

Marte, o planeta vermelho, é o quarto planeta mais distante do Sol. É também o mais explorado entre os planetas do Sistema Solar, com muito foco em buscar sinais de vida tanto atuais quanto de seres extintos. Com as condições extremas do planeta, as possibilidades de se encontrar vida atual são pequenas.

Existem indicações que Marte pode ter sido habitável no passado. Cientistas da Agência Espacial Européia pensam que entre 4,1 e 3,7 bilhões de anos atrás Marte possuía uma atmosfera que, juntamente com intensas atividades vulcânicas, permitiu que o planeta se aquecesse o suficiente para formar nuvens e chuva e, assim, um ambiente favorável ao desenvolvimento de vida. Atualmente, Marte não possui mais o campo magnético que protegia sua atmosfera, tornando-a rarefeita demais para manter uma temperatura que permita a existência de água líquida. Agora esta água se encontra principalmente congelada nas regiões polares. Mesmo assim, as interações passadas entre água e solo podem ter permitido a liberação de nutrientes e, conseqüentemente, de vida.

A bioassinatura mais promissora de Marte é o metano. Na atmosfera atual do planeta estima-se que dure entre 300 e 600 anos, um tempo relativamente curto, ou seja, deve ter uma origem com uma frequência ou quantidade significativa. Na Terra, metano pode ser gerado biologicamente ou por vias abióticas, e ambas também podem ocorrer em Marte. Considera-se a possibilidade que este metano seja produzido por microorganismos metanogênicos que vivem ou viveram abaixo da camada de *permafrost*, um tipo de gelo, de Marte. Ou seja, podem existir seres que produzem este metano atualmente ou que agora estão extintos, deixando assim o composto

congelado na superfície que agora está sendo liberado conforme mudanças em temperatura. Mas mesmo considerando que  $\text{CH}_4$  de origem biológica é possível, as condições ambientais extremas e a raridade de certos ingredientes poderiam impedir que seres metanogênicos se multiplicassem a ponto de produzir metano a níveis detectáveis.

Metano também pode ser gerado por processos geológicos, como oxidação de ferro e atividades vulcânicas. Em Marte, pode ser que ocorra por serpentinização, um processo metamórfico que envolve o mineral olivina e dióxido de carbono e pode resultar em metano em determinadas circunstâncias. Estes elementos envolvidos estão presentes em Marte atualmente, e este processo indicaria a presença de atividades hidrotérmicas no planeta.

Agora Vênus possui condições ambientais ainda mais extremas do que as observadas em Marte, havendo pouquíssimas possibilidades viáveis de vida atual. A principal teoria discute a possibilidade de existir áreas habitáveis acima de nuvens. Possui aproximadamente o mesmo tamanho e massa da Terra, com nuvens de ácido sulfúrico e água, e uma densa atmosfera composta principalmente de  $\text{CO}_2$  que resulta em uma grande pressão e temperaturas que chegam a  $480^\circ\text{C}$  na superfície. Em consequência dessas características, o fenômeno do efeito estufa em Vênus é consideravelmente mais "poderoso" que o terrestre, concentrando muito mais calor na superfície.

Uma das características mais importantes de Vênus é a sua potencial perda de habitabilidade. Estima-se que esta potencial habitabilidade de Vênus tenha se perdido ao longo dos anos, possivelmente devido ao envelhecimento e consequente aumento de luminosidade do Sol, que teria empurrado sua zona habitável mais longe. Assim, este possível maior calor causado pelo Sol resultaria em um aumento nas taxas de evaporação de água, aumentando também a ação do efeito estufa no planeta, aumentando as temperaturas e assim por diante. Seria então um modelo do que pode vir a ocorrer a um planeta com o aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e do aumento das temperaturas, demonstrando assim que habitabilidade não é estática.

Houve muita discussão em relação a consideração de fosfina como uma possível bioassinatura para Venus. Em setembro de 2020, astrônomos britânicos publicaram um artigo na revista Nature afirmando terem detectado fosfina, possivelmente de

origem biológica, na atmosfera de Vênus. Isto seria uma possível bioassinatura para o planeta, porém novos dados indicam que houve um erro, e o que realmente estava sendo detectado era dióxido de enxofre, um composto abundante na atmosfera de Vênus que não é considerado como possível bioassinatura.

#### 4.8 EPISÓDIO 8 - OCEAN WORLDS

Outro tipo de astro particularmente interessante são os chamados *Ocean Worlds*, uma categoria de corpos celestes que apresenta oceanos líquidos. A vida como nós a conhecemos depende de água líquida, revelando o grande potencial destes locais para a astrobiologia. Exemplos incluem Europa, Titã, Enceladus, Ganimedes, Calisto, Plutão, Tritão, Ceres, entre outros. Não é necessário que a presença de um oceano seja irrefutavelmente confirmada, apenas o potencial já é o suficiente. Vamos falar em maiores detalhes de dois destes, Europa e Titã.

Um dos astros mais promissores quando se trata da busca por vida extraterrestre é Europa, uma das 79 luas até hoje descobertas orbitando o planeta Júpiter. Sua superfície é coberta por uma camada de gelo entre 15 e 25 km de profundidade com longas fraturas e manchas escuras de composição desconhecida, acima de um oceano líquido de 60 a 150 km de profundidade). Abaixo do oceano, pode ser que exista uma camada rochosa. A sonda espacial Galileo, lançada em 1989 pela NASA e que orbitou Júpiter e suas luas durante anos, é a principal fonte de informações que temos sobre Europa.

Europa pode ter elementos comumente associados com vida, como carbono e hidrogênio, desde sua formação. Ao analisar o comportamento do campo magnético de Júpiter ao redor de Europa, pesquisadores encontraram indícios da presença de um oceano de água salgada abaixo da sua superfície externa de gelo que cobre toda a sua extensão. A influência de Júpiter, pode meio de radiação e seu campo magnético, pode causar o aumento de temperaturas em Europa e poder auxiliar interações entre o fundo rochoso e a água do oceano, e é possível considerar a possibilidade de atividades geológicas, hidrotérmicas e até vulcânicas que permitissem a existência de vida nestas áreas.

Outro ponto de interesse é a facilidade de análise, já que uma sonda poderia coletar dados enquanto em órbita. Em 2013, o Telescópio Hubble coletou dados que

indicaram que a lua pudesse estar ativamente ejetando vapor, possivelmente de água, no espaço. Confirmação disso poderia, além de permitir a coleta de amostras para análise de uma missão em órbita, indicar atividade geológica em Europa.

Assim, Europa poderia apresentar os três principais requerimentos para vida mencionados anteriormente - uma fonte de energia, um solvente líquido e a presença de nutrientes para a formação de enzimas e de biomassa. Estas teorias são os principais pontos de estudo da missão Europa Clipper, que discutiremos no episódio 10.

Titã, por sua vez, é a maior lua do planeta Saturno. É envolta por uma espessa atmosfera de nitrogênio e metano, com sua camada mais externa sendo formada de água em forma de gelo, e suspeita-se que abaixo dela exista um oceano de água salgada líquida.

Titã é o único astro do Sistema Solar que apresenta um ciclo rotativo de líquidos similar ao ciclo da água terrestre, mas com diferentes elementos envolvidos. As temperaturas em Titã chegam a  $-179^{\circ}\text{C}$ , possibilitando a existência de metano e etano líquido exatamente como acontece com a água aqui na Terra. Estes dois compostos líquidos formam lagos e rios na camada externa de água congelada. Sua superfície apresenta poucas crateras de impacto por outros objetos celestes, indicando uma maior atividade geológica, e podem-se observar formações similares a dunas compostas por grãos de hidrocarbonetos. Imagine uma paisagem muito similar a da Terra, com lagos e vales e chuva, mas de elementos completamente diferentes. Outro ponto de interesse é que, ao interagir com a luz ultravioleta, as moléculas de metano e etano formam outros elementos relevantes como nitrogênio e oxigênio.

Dessa forma, Titã é considerado como um potencial local habitável. Não se sabe ainda a origem do metano em sua superfície, uma vez que continua detectável em grandes quantidades apesar de sua degradação por raios UV. O principal ponto de interesse para a busca por vida é o oceano interno, mas o ciclo de metano líquido apresenta uma possibilidade interessante. Ao analisar os três critérios para vida, Titã possui nutrientes (hidrocarbonetos, nitrogênio, entre outros) e uma fonte de energia. Uma forma de vida que utilizasse metano líquido como solvente ao invés de água, e fosse capaz de aguentar as temperaturas extremas, poderia sobreviver na superfície desta lua.

## 4.9 EPISÓDIO 9 - EXOPLANETAS

Exoplanetas, em sua definição mais básica, são planetas que orbitam outras estrelas além do Sol. O primeiro exoplaneta foi descoberto há 28 anos, em 1992, pelos astrônomos Aleksander Wolszczan e Dale Frail. Cerca de 4.455 exoplanetas já foram identificados, e especula-se que cada estrela na Via Láctea possui pelo menos um planeta em sua órbita.

Os instrumentos que possuímos hoje ainda não são avançados o suficiente para caracterizar estes planetas em grandes detalhes, como composição atmosférica ou imagens diretas. O máximo que conseguimos fazer é detectar sua presença e definir algumas características gerais. Existem 4 categorias nas quais dividimos exoplanetas, em geral em relação a seu tamanho: super-Terra, gigante gasoso, netuniano e terrestre.

As super-Terras são o tipo de exoplanetas com mais exemplares detectados, e também os mais promissores para a busca por vida. São caracterizadas por serem maiores que a Terra e menores que Netuno e podem ser planetas gasosos, rochosos ou ambos. Apesar do nome, esses exoplanetas podem ou não ter características similares às do nosso planeta. Assim, existem exoplanetas com características muito diferentes de qualquer astro que conhecemos no Sistema Solar, abrindo então uma enorme quantidade de possibilidades para a astrobiologia.

Netunianos são planetas gasosos de tamanho similar a Netuno ou Urano. Não se sabe muito de suas composições, uma vez que suas atmosferas apresentam camadas densas de nuvens que bloqueiam a luz e impedem análises espectrais remotas. Espera-se que missões como o Telescópio Espacial James Webb, que discutiremos no próximo episódio, possibilitem análises mais detalhadas.

Gigantes gasosos são planetas compostos de hélio e hidrogênio, de tamanhos similares a Júpiter ou Saturno ou até muito maiores que isso. São caracterizados por não possuírem superfícies rochosas, e sim apenas de gás. Também podem ser encontrados em órbitas muito próximas de suas estrelas, algo não observado no Sistema Solar.

A última categoria, os terrestres, são planetas rochosos de tamanho similar ou menores que a Terra. Exemplos destes incluem os 7 exoplanetas localizados na zona habitável do sistema da estrela TRAPPIST-1, descobertos em 2017.



O exoplaneta mais próximo da Terra orbita a estrela Proxima Centauri. O Proxima Centauri b, como é chamado, é do tipo super-Terra e está a aproximadamente 4 anos-luz de distância. As próximas missões espaciais estão especialmente programadas para o estudo de exoplanetas.

#### 4.10 EPISÓDIO 10 - NOVOS HORIZONTES

Agora que conhecemos um pouco melhor as pesquisas em astrobiologia e o que sabemos até agora, quais são as perspectivas para o futuro? Quais são as próximas missões planejadas e quais novas descobertas nos esperam com elas?

Estudos em astrobiologia são regularmente realizados por agências espaciais de diversos países, como a NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço), a ESA (Agência Espacial Europeia), a CNSA (Agência Espacial Nacional Chinesa) e a Roscosmos (Agência Espacial Russa). Há também pesquisas realizadas por cientistas vinculados a universidades, como a Universidade de Illinois Urbana-Champaign nos EUA e a Universidade de Edimburgo na Escócia. No Brasil, a área ainda está no começo, mas o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP) possui um Núcleo de Pesquisa em Astrobiologia.

Ainda existem muitas análises que nossos equipamentos atuais não são capazes de realizar. Os dados são, na grande maioria das vezes, coletados de forma remota. Só será possível conseguir dados mais precisos, como imagens e análises de solo, com missões espaciais específicas que necessitam de muito dinheiro e tempo. As análises de exoplanetas são ainda mais difíceis, com apenas a detecção de sua existência sendo possível no momento. Vamos discutir algumas das missões planejadas para as próximas décadas que prometem avançar neste quesito.

O lançamento mais próximo é do Telescópio Espacial James Webb, previsto para 2021. Projetado por uma colaboração entre as agências espaciais americana, europeia e canadense, ele complementará as observações feitas pelo Telescópio Espacial Hubble. O James Webb possui uma sensibilidade maior do espectro infravermelho e de fotografia direta, permitindo pela primeira vez a análise de atmosferas de exoplanetas. Também possibilitará imagens diretas, mas não próximas ou detalhadas, de exoplanetas. Espera-se apenas imagens de pontos distantes ao

redor de estrelas, não as incríveis imagens que temos hoje de astros do Sistema Solar. Falando no Sistema Solar, o James Webb também será utilizado para análises mais detalhadas das atmosferas de astros próximos. Outros de seus objetivos incluem estudar o ciclo de vida de estrelas e galáxias. Dentre as bioassinaturas discutidas anteriormente, os instrumentos do James Webb terão uma maior probabilidade de detectar metano em atmosferas similares à da Terra jovem, antes dos altos níveis de oxigênio, do que outras bioassinaturas.

Mesmo possuindo essas capacidades, não é garantido que o James Webb seja capaz de detectar sinais de vida mesmo que eles estejam presentes. Será a primeira tentativa, mas existem outros projetos mais avançados sendo desenvolvidos.

O LUVOIR, ou Large UV Optical Infrared Surveyor, ainda não tem data de lançamento, mas foi projetado para o final da década de 2030. Formado por dois telescópios separados em A e B, este projeto terá mais sensibilidade e resolução para estudar exoplanetas distantes. Um de seus instrumentos, o ECLIPS, filtrará luz estelar e nos permitirá imagens e caracterizações diretas de exoplanetas, não importando o quão próximo este esteja de sua estrela. Por meio de espectroscopia, poderá descrever em detalhes atmosferas e até superfícies de uma grande quantidade de exoplanetas de diversos tipos a distâncias de até 25 parsecs, assim como de astros do próprio Sistema Solar. Terá a capacidade de detectar importantes bioassinaturas gasosas, como oxigênio e ozônio. Será uma adição indispensável para a busca por sinais de vida extraterrestre.

Um telescópio espacial com um espelho menor que o do LUVOIR e com um foco nos exoplanetas mais próximos, é o HabEx, ou Habitable Exoplanet Observatory. Como o LUVOIR, o HabEx terá como objetivo a busca e análise de exoplanetas, em especial os com maior potencial para a existência de vida, e instrumentos de imagens diretas e de espectroscopia. Também está planejado para a década de 2030 e é coordenado pela NASA. O relatório oficial do HabEx indica sua capacidade de detectar e analisar concentrações de bioassinaturas, comparando-as entre si. Vapor de água, oxigênio e ozônio poderão ser detectados em concentrações de até 1% do que temos hoje na atmosfera terrestre atual.

Há também as missões planejadas para estudarem astros específicos. O recente Mars2020 e o ExoMars enviaram dados a partir da superfície de Marte, o Europa

Clipper coletará dados de Europa, o Dragonfly de Titã, o JUICE terá como objetivo principal Júpiter e três de suas luas, Europa, Calisto e Ganimedes, entre outras.

O ExoMars é um programa conjunto da Agência Espacial Européia (ESA) e da Agência Espacial Russa (Roscosmos) cujos principais objetivos incluem buscar evidências de vida em Marte em algum momento da história do planeta e analisar a sua composição atmosférica. Ele possui duas etapas: a primeira, o Trace Gas Orbiter, foi lançada em 2016 e a segunda, que consiste do rover e de uma plataforma de superfície, que está marcada para 2022. O TGO busca bioassinaturas na atmosfera e suas origens, enquanto a de 2022 realizará estudos do solo em diversas profundidades. Um dos principais pontos de interesse é a confirmação da existência de metano em Marte.

O Europa Clipper, desenvolvido pela NASA, tem como objetivo principal realizar uma análise detalhada de Europa, buscando confirmar as suspeitas mencionadas no episódio que fizemos sobre ela. Terá uma variedade de instrumentos com uma maior resolução do que as missões anteriores, sendo capaz de capturar imagens, espectros, estrutura geológica, entre outros dados. Assim, poderá comprovar a existência de um oceano, sua profundidade e salinidade, além da composição química das diferentes camadas, especialmente das 'manchas' avermelhadas observadas na superfície. Outro instrumento interessante é um radar que fisicamente penetrará a superfície de gelo de Europa para estudar amostras. Não terá instrumentos específicos para a busca por vida, mas buscará determinar se existem condições favoráveis como se suspeita. Tem o lançamento previsto para a metade da década de 2020.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho, foi feita uma revisão bibliográfica do tipo narrativa sobre bioassinaturas e como seus estudos são realizados dentro da área de astrobiologia e para que. Foram então produzidos 10 episódios de podcast, com tempo previsto entre 3 e 5 minutos, sobre o assunto. Com eles, será feita a divulgação científica em plataformas *online* em um próximo trabalho e espera-se que auxilie na divulgação da área e de informação no Brasil. Os objetivos específicos foram detalhados na revisão bibliográfica. Com isso, foi possível explicar como a astrobiologia teve seu início, as

bases da pesquisa com bioassinaturas e seu caráter especulativo e apresentar as mais importantes perspectivas para o futuro de estudos em astrobiologia.

## REFERÊNCIAS

ARNEY, G. N.; KANE, S. Venus as an analog for hot Earths. In: MEADOWS, V. et al. **Planetary Astrobiology**. The University of Arizona Press, 2020. p. 355-378

CLAUDI, R. **Exoplanets: Possible Biosignatures**, ago. 2017. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1708.05829>>.

COCKELL, C. S. et al. Habitability: A Review. **Astrobiology**, v. 16, n.1, p.89-117, jan. 2016. DOI: 10.1089/ast.2015.1295.

DE MELO, C. A. R.; CHAVES, P. E. E.; DE OLIVEIRA, L. F. S.; MACHADO, M. M.; FARIAS, F. M. CIÊNCIA NO VELHO OESTE: O USO DE UM PODCAST NA DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA. **Anais do Salão Internacional de Ensino**, Pesquisa e Extensão, v. 10, n. 3, fev. 2020

ESA, The Enigma of Methane on Mars. Disponível em <https://exploration.esa.int/web/mars/-/46038-methane-on-mars>. Acesso em 16 jul. 2021a.

ESA, The Ages of Mars. Disponível em <https://exploration.esa.int/web/mars/-/55482-the-ages-of-mars>. Acesso em 16 jul. 2021b.

ESA, What is ExoMars? Disponível em [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Exploration/ExoMars/What\\_is\\_ExoMars](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/What_is_ExoMars). Acesso em 20 jul. 2021c.

HENDRIX, A. R. et al. The NASA Roadmap to Ocean Worlds. **Astrobiology**, v. 19, n.1, p. 1–27, jan. 2019. DOI: 10.1089/ast.2018.1955.

KAPLAN, H.; VERMA, D.; SARGSYAN, Z.. What Traditional Lectures Can Learn From Podcasts. **Journal of graduate medical education**, v. 12, p. 250–253, 3 jun. 2020. DOI: 10.4300/JGME-D-19-00619.1.

MACKENZIE, L. E. Science podcasts: analysis of global production and output from 2004 to 2018. **Royal Society Open Science**, v. 6, n. 1, jan. 2019

MARTIN, G. F. S.; BOAS, A. C. V.; ARRUDA, S. de M.; PASSOS, M. M. Podcasts e o interesse pelas ciências. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 25, n. 1, p. 77-98, abr. 2020

MEADOWS, V. S. et al. Exoplanet Biosignatures: Understanding Oxygen as a Biosignature in the Context of Its Environment. **Astrobiology**, v. 18, n.6, p. 630–662, jun. 2018. DOI: 10.1089/ast.2017.1727.

NASA, Eyes on Exoplanets. Disponível em <https://exoplanets.nasa.gov/eyes-on-exoplanets/#/filter/KeplerConfirmed/>. Acesso em 24 mai. 2021a.

NASA, Planetary Analogs. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/planets/planetary-analogs/>. Acesso em 03 ago. 2021b.

NASA, Mars | In Depth. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/planets/mars/in-depth/>. Acesso em 20 jul. 2021c.

NASA, Venus | In Depth. [https://solarsystem.nasa.gov/planets/venus/in-depth/#otp\\_atmosphere](https://solarsystem.nasa.gov/planets/venus/in-depth/#otp_atmosphere). Acesso em 23 jul. 2021d.

NASA, Europa | In Depth. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/moons/jupiter-moons/europa/in-depth/>. Acesso em 11 jul. 2021e.

NASA, Evidence For an Ocean | Why Europa? Disponível em <https://europa.nasa.gov/why-europa/evidence-for-an-ocean/>. Acesso em 11 jul. 2021f.

NASA, Ingredients for Life? | Why Europa? Disponível em <https://europa.nasa.gov/why-europa/ingredients-for-life/>. Acesso em 18 jul. 2021g.

NASA, Nasa Scientists Confirm Water Vapor On Europa. Disponível em <https://astrobiology.nasa.gov/news/nasa-scientists-confirm-water-vapor-on-europa/>. Acesso em 20 mar. 2021h.

NASA, Titan | In Depth. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/titan/in-depth/>. Acesso em 21 jul. 2021i.

NASA, Super-Earth. Disponível em <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/super-earth/>. Acesso em 19 jul. 2021j.

NASA, Neptune-like. Disponível em <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/neptune-like/>. Acesso em 04 ago. 2021k.

NASA, Gas Giant. Disponível em <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/gas-giant/>. Acesso em 04 ago. 2021l.

NASA, Terrestrial. Disponível em <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/terrestrial/>. Acesso em 04 ago. 2021m.

NASA, Proxima Centauri b. Disponível em <https://exoplanets.nasa.gov/resources/2211/proxima-b-3d-model/>. Acesso em 03 ago. 2021n.

NASA, James Webb Space Telescope Other Worlds. Disponível em <https://www.jwst.nasa.gov/content/science/origins.html#keyConcepts>. Acesso em 22 jul. 2021o.

NASA, James Webb Space Telescope Science Themes. Disponível em <https://www.jwst.nasa.gov/content/science/index.html>. Acesso em 22 jul. 2021p.

NASA, LUVOIR Final Report. Disponível em <https://www.luvoirtelescope.org/copy-of-design>. Acesso em 20 mai. 2021q.

NASA, HabEx Final Report. Disponível em <https://www.jpl.nasa.gov/habex/documents/>. Acesso em 13 jun. 2021r.

NASA, Europa Clipper Instruments. Disponível em <https://europa.nasa.gov/spacecraft/instruments/>. Acesso em 20 jul. 2021s.

NASA, Meet Europa Clipper. Disponível em <https://europa.nasa.gov/spacecraft/meet-europa-clipper/>. Acesso em 20 jul. 2021t.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe**. Washington, DC: The National Academies Press, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17226/25252>.

PALLÉ, E. The Detectability of Earth's Biosignatures Across Time. In: DEEG, H.; BELMONTE, J. **Handbook of Exoplanets**. Springer International Publishing, 2018. p. 3225-3241.

SACHKOV, M. E.; SHEMATOVICH, V. I. Exoplanet Habitability: Potential O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> Biosignatures in the Ultraviolet. **Solar System Research**, v. 53, n.5, p. 339-348, set. 2019. DOI: 10.1134/S003809461905006X.

SCHWIETERMAN, E. W. et al. Exoplanet Biosignatures: A Review of Remotely Detectable Signs of Life. **Astrobiology**, v.18, n.6, p. 663-708, jun. 2018a. DOI:<https://doi.org/10.1089/ast.2017.1729>

SCHWIETERMAN, E.; LYONS, T.; REINHARD, C. Signs of life on a global scale: Earth as a laboratory for exoplanet biosignatures. **The Biochemist**. v. 40, n.6, p. 22-27, dez. 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1042/BIO04006022>

SCHWIETERMAN, Edward W. Surface and Temporal Biosignatures. In: DEEG, H.; BELMONTE, J. **Handbook of Exoplanets**. Springer International Publishing, 2018c. P. 1–29. DOI: 10.1007/978-3-319-30648-3\_69-1.

SETO, M.; NOGUCHI, K.; CAPPELLEN, P. V. Potential for Aerobic Methanotrophic Metabolism on Mars. **Astrobiology**, v. 19, N,10, p. 1187–1195, 10 out. 2019. DOI: 10.1089/ast.2018.1943.

UNIVERSITY OF WASHINGTON, Phosphine on Venus. Disponível em <https://www.washington.edu/news/2021/01/27/phosphine-venus-so2/>. Acesso em 16 jul. 2021.

WALKER, S. I. et al. Exoplanet Biosignatures: Future Directions. **Astrobiology**, v.18, n.6, p. 779-824, jun. 2018. DOI: <http://doi.org/10.1089/ast.2017.1738>

WOGAN, N.; KRISSANSEN-TOTTON, J.; CATLING, D. C. Abundant Atmospheric Methane from Volcanism on Terrestrial Planets Is Unlikely and Strengthens the Case

for Methane as a Biosignature. **The Planetary Science Journal**, v. 1, n.3, p. 58, 3 out. 2020. DOI: 10.3847/psj/abb99e.

YUNG, Y. L. et al. Methane on Mars and Habitability: Challenges and Responses. v. 18., n.10, p. 1221-1242, out. 2018. DOI: 10.1089/ast.2018.1917.