

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Vitória Bellecerie da Fonseca

Zonas Habitáveis Circumplanetárias: Uma Nova Fronteira

São Paulo

2022

Vitória Bellecerie da Fonseca

Zonas Habitáveis Circumplanetárias: Uma Nova Fronteira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Janot Pa-
checo (IAG/USP)

São Paulo

2022

Dedico a todas as mulheres que me antecederam e que, mesmo tendo sido queimadas em fogueiras, presas, violentadas ou impedidas de exercer seus trabalhos e paixões, lutaram pelas suas vidas e pela minha também, para que hoje eu pudesse concluir esta pesquisa que tanto aprecio. Também dedico à Vitória de 14 anos por não ter desistido do sonho de ser uma cientista. Nós conseguimos.

Agradecimentos

Em primeiro ponto, agradeço ao Universo por ter me trazido aqui após diversas trilhas, portas e pedras que, em conjunto, fizeram eu me tornar exatamente quem eu precisava ser neste momento.

Aos planetas Saturno e Júpiter, gigantes que foram os primeiros a instigar minha curiosidade pela Astronomia e que, coincidentemente ou não, são os protagonistas de toda a minha pesquisa e continuam me deixando fascinada. Aqui deixo registrada a minha paixão.

À minha família, por sempre me proporcionar condições para que eu possa me dedicar aos estudos e me apoiar no propósito de viver para a ciência.

Aos meus amigos, acima de tudo às minhas amigas, por compartilharem momentos e estudos (intermináveis listas de exercícios nas madrugadas) que me motivam todos os dias a não desistir do meu sonho. Vamos conquistar o mundo juntas.

A todos os professores que cruzaram meu caminho e auxiliaram de alguma forma a ser quem eu sou hoje. Em especial, aos professores Estela, Tânia e Fernando que me auxiliaram no início da descoberta da paixão pela ciência na escola. Aos orientadores que me acompanharam mais de perto durante a graduação, Prof.^a Dr.^a Elysandra Figueredo Cypriano e Prof. Dr. Eduardo Janot Pacheco, e que me receberam de portas abertas com grandes oportunidades, como os projetos Cecília e Astrominas, a publicação de um artigo na revista Cadernos de Astronomia e a participação em conferências e simpósios.

Agradeço à Dr.^a Amanda Gonçalves Bendia, do Instituto Oceanográfico (IO/USP), pelo auxílio com as condições de sobrevivência dos extremófilos terrestres em fontes hidrotermais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), deixo meu

agradecimento pelo apoio nos projetos de Iniciação Científica em Habitabilidade em Luas do Sistema Solar, sob os editais PIBIC 2020-2678, 2021-2114 e 2022-2076.

Um último agradecimento especial a todos que compõem o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP), pelo acolhimento durante os anos de graduação e também pela concessão de verba para que eu pudesse participar do XXI Colóquio Brasileiro de Dinâmica Orbital (CBDO), realizado no INPE em dezembro de 2022, apresentando a minha pesquisa.

*“Though my soul may set in darkness, it will rise in perfect light;
I have loved the stars too truly to be fearful of the night.”*

The Old Astronomer, Twilight Hours (Sarah Williams, 1868)

“Dare mighty things”

Perseverance Mission (NASA, 2020)

Resumo

As missões espaciais realizadas nas décadas 1980-2000 trouxeram imensos progressos em nossos conhecimentos sobre as condições físicas e químicas existentes nas grandes luas dos planetas gigantes gasosos do Sistema Solar. Sobrevoos próximos sobretudo de Europa e Enceladus, mas também Titan, Ganimedes e Calisto, revelaram características surpreendentes sobre essas luas e permitiram compor um quadro bastante detalhado de suas superfícies e interiores. A descoberta de oceanos sub-superficiais em praticamente todas as grandes luas de Saturno e Júpiter abriu a extraordinária perspectiva de presumir que existe uma Zona Habitável Circumplanetária, distinta do conceito clássico por contabilizar que o aquecimento ocorre, por exemplo, via marés gravitacionais e/ou fenômenos geofísicos no interior dos corpos. Neste trabalho, são apresentadas características físicas e químicas gerais sobre os satélites Enceladus e Europa que permitem verificar sua potencial habitabilidade. Além disso, estimamos que algumas espécies de microorganismos extremófilos terrestres que vivem em ambientes análogos às luas poderiam sobreviver nelas.

Abstract

Space missions carried out in the 1980-2000s brought immense advances in our knowledge of the physical and chemical conditions existing on the large moons of the gas giant planets in the Solar System. Close flybys, especially of Europa and Enceladus, but also of Titan, Ganymede and Callisto, revealed surprising features on these moons and made it possible to compose a very detailed picture of their surfaces and interiors. The discovery of subsurface oceans in almost all of the large moons of Saturn and Jupiter opened the extraordinary prospect of assuming that there is a Circumplanetary Habitable Zone, distinct from the classical concept by accounting that warming occurs, for example, via gravitational tides and/or geophysical phenomena inside bodies. In this work, general physical and chemical characteristics of the satellites Enceladus and Europa are presented, which allow verifying their potential habitability. Furthermore, we estimate that some species of terrestrial extremophile microorganisms that live in environments analogous to the moons could survive on them.

Lista de Figuras

1.1	Mundos Oceânicos	21
1.2	Europa	22
1.3	Enceladus	22
2.1	<i>Tiger Stripes</i> de Enceladus	26
2.2	Corte Transversal de Lua com Oceano Interior	26
4.1	Limites da Vida	32
4.2	<i>Methanothermococcus okinawensis</i>	34
4.3	Chaminé Branca na Terra	35
4.4	Chaminé Preta na Terra	35
4.5	Fontes Hidrotermais Terrestres	36
5.1	Exolua em Formação no Sistema Estelar PDS 70	40
A.1	Esquema de Rotação Síncrona	51
B.1	Escoamento de Fluidos	54
B.2	Variação das Plumas de Enceladus	54
B.3	Variação da Intensidade das Plumas de Enceladus	55
B.4	Variação da Excentricidade Orbital de Enceladus	55
B.5	Mapa em Cores de Enceladus	56
B.6	Modelo do Vórtice Oceânico de Enceladus	57
C.1	Mapa em Cores de Europa	60
C.2	Caos Conamara em Europa	61

C.3	Bandas Vermelhas em Europa	61
C.4	Colunas de Taylor	62
D.1	Condições de Crescimento de Extremófilos	65
D.2	Ambientes Extremos na Terra	66
D.3	Tardígrado	66
D.4	<i>Deinococcus radiodurans</i>	66
E.1	Sonda <i>Galileo</i>	67
E.2	Sonda <i>Cassini-Huygens</i> e Instrumentos	67
E.3	Distância São Paulo (SP) e Belo Horizonte (MG)	68
E.4	Anel E de Saturno	68
E.5	Júpiter e Luas Galileanas	69
E.6	Distância São Paulo (SP) e Oiapoque (AP)	69

Lista de Tabelas

1.1	Parâmetros Físicos e de Massa: Enceladus, Europa, Lua e Terra	21
1.2	Parâmetros Orbitais: Enceladus, Europa, Lua e Terra	23
4.1	Nomenclatura de Extremófilos	33
4.2	Características Físicas e Químicas de Enceladus e Europa	37
4.3	Possíveis Extremófilos a Sobreviverem em Enceladus e Europa	37

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
1.1 Satélites Naturais e Habitabilidade	19
1.2 Dinâmica Orbital	22
2. <i>Retrato de Enceladus</i>	25
2.1 Características Físicas e Químicas	26
3. <i>Retrato de Europa</i>	29
3.1 Características Físicas e Químicas	29
4. <i>Astrobiologia: À Procura de Vida Extraterrestre</i>	31
4.1 Organismos Extremófilos	32
4.2 Análogo Terrestre: Fontes Hidrotermais Oceânicas	35
4.3 Habitabilidade em Luas do Sistema Solar	36
5. <i>Conclusões e Perspectivas</i>	39
<i>Referências</i>	43
<i>Apêndice</i>	49
A. <i>Dinâmica Orbital</i>	51
B. <i>Enceladus</i>	53
B.1 Dinâmica Orbital	53
B.2 Superfície	56

B.3	Dinâmica Oceânica; Atividade Criovulcânica	56
C.	<i>Europa</i>	59
C.1	Dinâmica Orbital	59
C.2	Superfície	59
C.3	Dinâmica Oceânica	61
D.	<i>Extremófilos</i>	65
E.	<i>Figuras</i>	67
E.1	Sondas Espaciais <i>Galileo</i> e <i>Cassini-Huygens</i>	67
E.2	Imagens Complementares Enceladus	68
E.3	Imagens Complementares Europa	69

Introdução

1.1 Satélites Naturais e Habitabilidade

A vida, como a conhecemos na Terra, existe e se desenvolve graças à proteção da atmosfera. Entre outras vantagens, ela impede que radiações nocivas vindas do Sol e da Via Láctea atinjam o planeta e assegura, na superfície, temperaturas adequadas à sua sobrevivência por meio do efeito estufa. Por essa razão, até anos recentes, o foco principal das pesquisas sobre habitabilidade em ambientes extraterrestres se concentrou em exoplanetas e no conceito de Zona Habitável (ZH), a região em torno de uma estrela onde a temperatura na superfície de um planeta com atmosfera permite a existência de água (H_2O) em estado líquido (Olsson-Francis et al., 2018). Essa ZH é também chamada de planetária ou radiativa, sendo calculada de modo que, em suas bordas interior e exterior, as temperaturas extremas do planeta sejam de 100 e 0 °C, respectivamente. Calcular uma ZH é tarefa bastante complexa, pois envolve, entre outros fatores, a presença de uma atmosfera.

O conceito de habitabilidade utilizado acima é, na verdade, claramente antropocêntrico, já que supõe que a vida extraterrestre requer meios e condições semelhantes aos dos organismos terrestres como, por exemplo, a presença de H_2O como solvente para assegurar as reações químicas entre moléculas orgânicas. Os reais limites para a vida cósmica são desconhecidos, mas a hipótese de condições similares às da Terra, apesar de limitada, é um início razoável para um estudo sobre habitabilidade já que, até que se possua dados detalhados sobre outros planetas habitados, as discussões sobre vida no Universo são necessariamente enviesadas no conhecimento humano. Acredita-se hoje que, em um passado remoto da Terra, substâncias pré-bióticas reagiram espontaneamente em meio aquoso para

sintetizar moléculas mais complexas, chegando finalmente ao RNA e DNA, componentes celulares indispensáveis para todo tipo de vida conhecida (Shapiro, 2007).

Planetas massivos, inclusive os gigantes gasosos, tendem a ter mais satélites, em decorrência do processo de formação por acreção, e isso deve ter sucedido igualmente com exoplanetas, fora do Sistema Solar. Em um sistema dinâmico de N-corpos, ocorrem interações gravitacionais que podem produzir órbitas com ressonâncias. Objetos ressonantes estão sujeitos a um padrão de movimentação específico ao redor do corpo principal, neste caso um planeta, e a marés gravitacionais que variam de maneira periódica, com a consequente transformação de energia cinética de rotação em energia térmica.

Com a chegada da Era Espacial a partir do final do século XX, observações do solo com grandes telescópios e do telescópio espacial *Hubble* (1990-) levaram a uma nova fronteira no estudo de objetos do Sistema Solar. Mais ainda, sondas espaciais enviadas para os planetas mais distantes possibilitaram a procura por condições de habitabilidade fora da Terra. Podem ser citadas as missões *Pioneer 10* (1973), *Pioneer 11* (1974) e *Voyager 1* e *Voyager 2*, de 1979, que cruzaram o sistema de Júpiter, trazendo pela primeira vez maiores detalhes sobre seus satélites por meio de *flybys*, isto é, voos muito próximos. Em particular, com a sonda *Galileo* (1989-2003); ver Figura E.1, da agência espacial estadunidense (NASA), foi feito um estudo mais detalhado acerca da atividade vulcânica de Io, a possibilidade de Europa conter água em estado líquido, a superfície com muitas crateras de Calisto e o campo magnético de Ganimedes. Atualmente, a sonda *Juno* (NASA, 2011-) está explorando o planeta gigante.

Já para o sistema de Saturno, a missão *Cassini-Huygens* (1997-2017), ver Figura E.2 da sonda com os principais instrumentos, parceria entre as agências italiana (ASI), europeia (ESA) e NASA, foi essencial para a descoberta e observação de diversas luas, bem como os anéis do planeta. O *lander Huygens* inclusive pousou na lua Titan em 2005, investigando sua atmosfera e composição superficial, ricas em materiais orgânicos. O *Grand Finale* da *Cassini* foi o lançamento intencional na densa atmosfera do gigante gasoso. Tal estratégia também foi utilizada com a *Galileo*, a fim de não haver riscos de contaminação por elementos terrestres em Enceladus, Titan e Europa.

Assim, diversas luas, nas quais confirmou-se a presença de oceanos salgados abaixo de suas superfícies geladas, foram classificadas como “Mundos Oceânicos”, como mostra a Figura 1.1, com o volume e porcentagem em massa de água líquida em cada corpo, em

comparação à Terra. De fato, existe tal estrutura nos satélites de Júpiter (*e.g.*, Europa, Ganimedes e Calisto) e de Saturno (Titan e Enceladus, por exemplo); (Lunine, 2017)). Na Tabela 1.1, apresentamos uma comparação entre parâmetros físicos de Enceladus, Europa, Lua e Terra. O planeta é indicado apenas para facilitar o entendimento dos demais dados.



Figura 1.1: Quantidade de água em relação ao volume total e ao volume dos oceanos terrestres, de corpos oceânicos do Sistema Solar. Tradução livre de PHL/UPR Arcibo, NASA.

Tabela 1.1 - Parâmetros físicos e de massa.

Parâmetro	Enceladus	Europa	Lua	Terra
Raio equatorial	252,1 km	1560,8 km	1738,1 km	6378,1 km
Massa	$1,08 \cdot 10^{20}$ kg	$4,80 \cdot 10^{22}$ kg	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg	$5,97 \cdot 10^{24}$ kg
Densidade média	1610 kg/m ³	3010 kg/m ³	3344 kg/m ³	5513 kg/m ³
Gravidade superficial	0,113 m/s ²	1,310 m/s ²	1,620 m/s ²	9,800 m/s ²
Velocidade de escape	0,25 km/s	2,00 km/s	2,38 km/s	11,20 km/s
Albedo geométrico visual ¹	1,00 ²	0,68	0,12	0,43
Referências	JPL (nd) e NASA (2019)	NASA (2016) e NASA (2018)	NASA (2021b)	NASA (2021a)

Pelo indício de atividade geológica em andamento através da ejeção de plumas, constituídas por água e moléculas orgânicas, Enceladus (Figura 1.3) é visto como um *hotspot* na busca de potencial vida extraterrestre (Taubner et al., 2018; Kotlarz et al., 2020; Núñez et al., 2019). Europa (Figura 1.2) não fica atrás, com a evidência de um oceano global que interage com a superfície de gelo através de terrenos caóticos resultantes de atividade tectônica (Hesse et al., 2022). Em ambos satélites há, supostamente, fontes hidrotermais,

¹ Albedo representa a razão entre as quantidades de luz refletida e incidente por um corpo celeste.

² Enceladus é o objeto de maior albedo do Sistema Solar, em decorrência de sua cobertura de gelo.

as chaminés oceânicas formadas em áreas de contato de água e manto terrestre, estimulando reações químicas que levam a um ecossistema de rica biodiversidade.

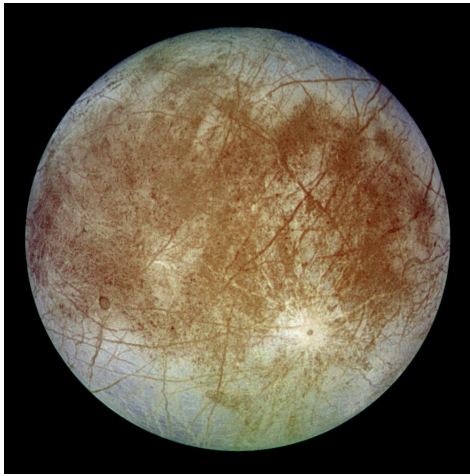


Figura 1.2: Europa, satélite JII de Júpiter. NASA/JPL-Caltech/SETI.

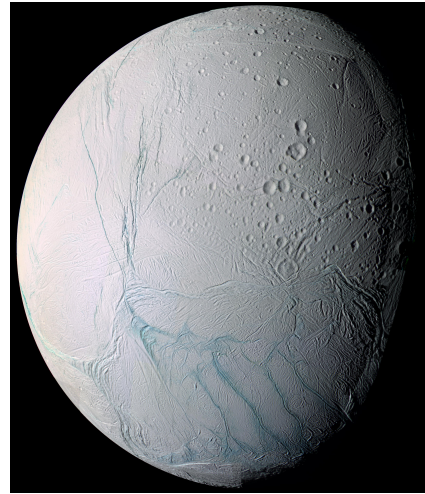


Figura 1.3: Enceladus, satélite SII de Saturno. NASA/JPL/SSI.

1.2 Dinâmica Orbital

As marés terrestres, alteração diária no nível das águas, são decorrentes de forças gravitacionais diferenciais sobretudo da Lua e do Sol, que “esticam” a Terra em uma forma oval e alongada na linha que conecta os corpos em interação, atingindo também a atmosfera e a crosta. Em sucessão, o período de rotação da Terra é maior do que o de translação da Lua, gerando fricção entre a crosta rochosa irregular e as águas, *i.e.*, há perda de energia cinética de rotação por parte da Terra, que é transferida em forma de potencial para a Lua. Isto gera torque sobre o satélite, forçando seu afastamento de cerca de 3,78 centímetros por ano e ainda fazendo com que a rotação terrestre esteja cada vez mais lenta. Também decorre desta dinâmica que a rotação e translação lunares estão em sincronia (Picazzio, 2019).

Ainda sobre o sistema Sol-Terra-Lua, há precessão do eixo de rotação da Terra, comparável ao movimento de um pião, que é o torque que atinge o planeta com tendência a alinhar este eixo à direção normal à eclíptica. Tal movimento é estabilizado pela presença da Lua, o que evita um regime caótico de rotação, como ocorre com Marte. Assim, não houve nem haverá no planeta épocas glaciais ou tórridas com durações de milhões de anos. Um ambiente tão conturbado termicamente talvez não tivesse permitido o desenvolvimento

de formas mais complexas de vida (Filho e Saraiva, 2017).

É estimado que, mantendo a taxa de separação anual, a Lua escape da influência gravitacional da Terra em cerca de 15 bilhões de anos. Quando a mesma se afastar pouco mais da metade de sua distância atual, a frequência de precessão terrestre cairá pela metade e o movimento do eixo será instável e caótico, permitindo que a obliquidade³ atinja ocasionalmente valores próximos a 90°. Todavia, possivelmente mais do que 1 bilhão de anos serão necessários para que isto aconteça. Além disso, o Sol alcançará a fase de gigante vermelha de sua evolução em 6 ou 7 bilhões de anos, já absorvendo os planetas interiores durante sua expansão (Ferraz-Mello, 2022a; NRAO e Mangum, J., 2013).

A Tabela 1.2 mostra parâmetros orbitais de Enceladus, Europa, Lua e Terra. Os dados do último são citados apenas para comparação.

Tabela 1.2 - Parâmetros orbitais. Os parâmetros da Terra são dados para seu movimento ao redor do Sol, a eclíptica, enquanto para os satélites é considerada a revolução em torno de seu planeta principal.

Parâmetro	Enceladus	Europa	Lua	Terra
Semieixo maior	$238,02 \cdot 10^3$ km	$671,1 \cdot 10^3$ km	$384,4 \cdot 10^3$ km	$149,6 \cdot 10^6$ km
Período orbital	1,40 dias	3,60 dias	27,30 dias	365,26 dias
Período de rotação	Síncrono	Síncrono	Síncrono	1 dia
Excentricidade orbital	0,0047	0,0090	0,0549	0,0167
Inclinação orbital	0,009°	0,470°	5,145° ⁴	23,440°
Referências	JPL (nd) e NASA (2019)	NASA (2018) e NASA (2016)	NASA (2021b)	NASA (2021a)

Mais definições e informações sobre dinâmica orbital estão no Apêndice A, sendo Enceladus enfatizado no Apêndice B.1 e Europa no Apêndice C.1.

³ A obliquidade de um planeta (ou satélite) é o ângulo formado entre o plano de seu equador e o plano de seu movimento orbital ao redor do Sol (ou do planeta principal).

⁴ Em relação à eclíptica.

Retrato de Enceladus

Enceladus (Figura 1.3) recebeu seu nome do gigante da mitologia grega, filho de Gaia e Uranus (IAU-WGPSN, nd). Seu diâmetro de cerca de 500 km (Tabela 1.1) pode ser comparado à distância, em linha reta, entre as cidades de São Paulo (SP) e Belo Horizonte (MG), ilustrado na Figura E.3.

Os vulcões terrestres expõem, por excesso de pressão interna, lava, isto é, rocha quente fundida. Ao invés disso, criovulcões ejetam líquidos gelados ou gases congelados. É uma mistura aquosa com material orgânico, no caso de Enceladus. O fenômeno pode ser pensado como um jato de gêiser, uma “pluma”, que atinge a velocidade de escape e é lançado no espaço.

O criovulcanismo ocorre no polo Sul da lua, a partir de quatro fissuras nomeadas *Tiger Stripes* (“listras de tigre”), indicadas na Figura 2.1. As mesmas foram designadas em referência a cidades mencionadas no conto popular do Oriente Médio “As Mil e Uma Noites”: Alexandria, Cairo, Bagdad e Damascus. Seu nome é seguido pelo termo *sulcus* (plural *sulci*), do latim.

Como resultado do travamento de maré com Saturno, Enceladus tem um período de rotação síncrono em comparação ao planeta principal (Tabela 1.2), mantendo sempre a mesma face voltada para este. Possivelmente essa dissipação por marés é a principal responsável da atividade da lua (Schoenfeld et al., 2020). Além disso, a ressonância orbital 2:1 com o satélite Dione (Zhang e Nimmo, 2009) e o decaimento radioativo de componentes do núcleo também podem contribuir para o fenômeno (Hansen et al., 2019; Zalewska e Kotlarz, 2019). Ainda, é possível notar, como demonstramos, a relação direta entre a atividade das plumas, a distância entre Enceladus e Saturno ao longo de sua órbita e a variação da excentricidade orbital do satélite, consequência da interação de N-corpos,

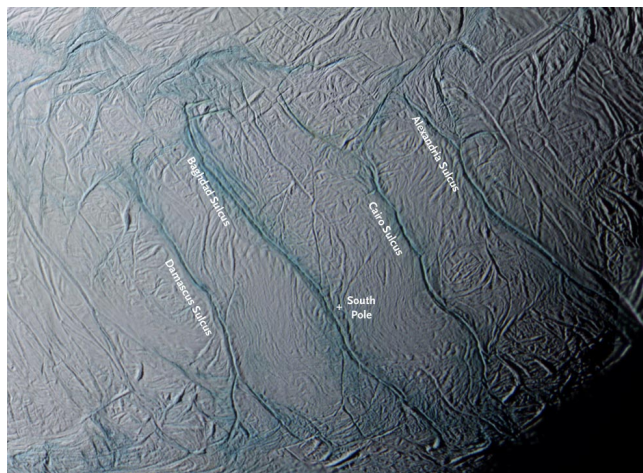


Figura 2.1: *Tiger stripes* na superfície de Enceladus. São mostrados os *sulci* Alexandria, Cairo, Bahgdad e Damascus, bem como o Polo Sul. NASA/JPL/SSI/CICLOPS.

melhor explicitada na Seção B.1.

2.1 Características Físicas e Químicas

Dados adquiridos pela sonda *Cassini* e modelos sugerem que o interior de Enceladus é distribuído em três regiões principais: um núcleo rochoso e poroso; um oceano global de água salgada de 20-50 km de profundidade; uma camada de gelo de 10-30 km de espessura (Choblet et al., 2017; Hemingway et al., 2018; Zeng e Jansen, 2021). A Figura 2.2 é uma seção transversal que indica a estrutura prevista para o satélite.

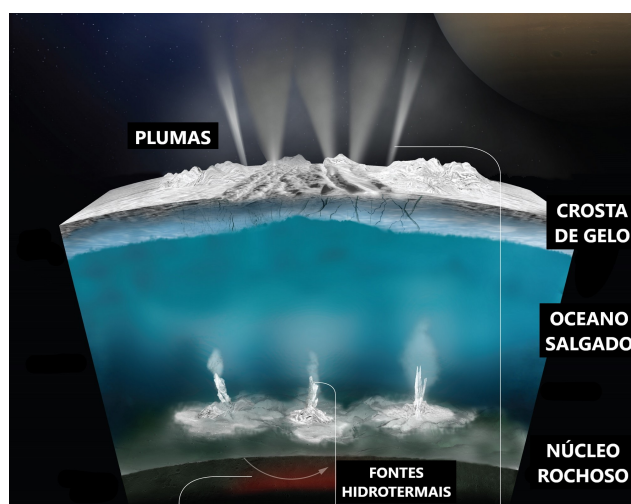


Figura 2.2: Ilustração do corte transversal para uma lua oceânica, como Enceladus e Europa. Adaptada e traduzida de NASA/JPL-Caltech/Southwest Research Institute.

Através dos *flybys* da *Cassini*, o espectrômetro de massa e o coletor de poeira cósmica

identificaram que a composição das plumas é primariamente água (mais de 90% de H_2O). Além disso, gás carbônico (CO_2), amônia (NH_3), metano (CH_4), hidrogênio molecular (H_2), sulfato de hidrogênio (H_2S), metanol (CH_3OH), cianeto de hidrogênio (HCN) e outros compostos orgânicos leves estão presentes. Também há sais, como cloreto de sódio (NaCl), carbonato de sódio (Na_2CO_3), bicarbonato de sódio (NaHCO_3) e cloreto de potássio (KCl) (Kotlarz et al., 2020; Taubner et al., 2018). Ainda, por simulações cinéticas e termodinâmicas (Hao et al., 2022), é esperado que haja grande quantidade de fósforo (P) dissolvido na água. O pH do oceano é estimado entre 11 e 12. Os componentes orgânicos possivelmente são sintetizados nas fontes hidrotermais, a partir da reação de serpentinização do mineral olivina.

De acordo com JPL (2021), é previsto que a energia térmica total gerada no satélite seja de 15,8 gigawatts (GW), contra 1600,0 GW produzida em Europa. Em comparação, a potência gerada na Usina Hidrelétrica de Itaipu, entre o Brasil e o Paraguai, é de 14 GW (Itaipu Binacional, nd).

A superfície de Enceladus é melhor detalhada na Seção B.2. A dinâmica oceânica e atividade criovulcânica é explicitada na Seção B.3.

Retrato de Europa

Os satélites galileanos, Io, Europa, Ganimedes e Calisto (Figura E.5), originaram-se a partir do material remanescente da formação de Júpiter pela nuvem de gás e poeira ao redor do proto-Sol. São considerados um “mini Sistema Solar” visto que, assim como ocorreu a diferenciação química e estrutural entre planetas interiores rochosos e exteriores gasosos, os satélites mais próximos ao planeta principal são mais densos, compostos por materiais mais rochosos e metálicos. Europa é, especificamente, a melhor candidata à habitabilidade entre eles por possuir uma combinação de atributos importantes: oceano interior, superfície com atividade geológica e estar em ressonância orbital com Io e Ganimedes na proporção de 1:2:4.

Na mitologia grega, Europa foi uma mortal raptada pelo deus Zeus, correspondente a Júpiter na cultura romana, concedendo seu nome tanto para o continente como para o satélite IAU-WGPSN (nd). Além disso, as linhas na superfície do satélite são nomeadas com referência aos contos da “Odisseia” de Homero, como Rhadamanthys e Agenor, e demais acidentes são denotados em função de mitos, heróis e localidades celtas, tais como Pwyll e Conamara, a título de exemplo (Greenberg, 2008). O diâmetro da mesma, próximo a 3000 km (Tabela 1.1), pode ser associado à distância entre as cidades de São Paulo (SP) e Oiapoque (AP), cidade mais setentrional do Brasil (Figura E.6).

3.1 Características Físicas e Químicas

O núcleo rochoso é possivelmente rico em ferro (Fe), está em contato com um oceano de cerca de 100 km de profundidade abaixo de uma camada de gelo de espessura 3-30 km. A estrutura é a mesma indicada na Figura 2.2. Foi constatado que o oceano e a crosta

de gelo são compostos majoritariamente por H_2O (cerca de 81%) seguida de sulfato de magnésio (MgSO_4) e sulfato de sódio (Na_2SO_4). Também são importantes NaCl , CO_2 e íons de cálcio (Ca^{2+}) e bicarbonato (HCO_3^-); (Lesage et al., 2021; Melwani Daswani et al., 2021).

Os processos mais relevantes para a formação da superfície de Europa são a atividade tectônica e a existência de terrenos caóticos, melhor descritos no Apêndice C.2. Há indícios de que há atividade tectônica na lua, através da movimentação de placas de gelo (Greenberg, 2008). E, além disso, Hesse et al. (2022) propõem que ondas de calor podem alargar momentaneamente aberturas na camada de gelo, provavelmente em regiões caóticas, possibilitando que materiais exógenos sigam da superfície ao oceano. Mais informações sobre a dinâmica oceânica estão no Apêndice C.3.

A existência de ejeção de material em Europa foi constatada com o telescópio espacial *Hubble* e por uma nova análise de imagens da *Galileo*. Em comparação às plumas de Enceladus, o fenômeno é de visualização mais difícil até para sondas espaciais, já que aparenta ser de menor intensidade e até mesmo esporádico, possivelmente devido à maior gravidade superficial da lua (Tabela 1.1).

Tendo em vista que a performance da missão *Galileo* não foi tão satisfatória quanto a da *Cassini*, por se tratar de uma tecnologia anterior, a análise sobre a atividade de Europa de forma geral não está tão consolidada quanto a de Enceladus, o que aliás justifica as novas missões planejadas para esta década ao sistema de Júpiter, comentadas na Seção 5.

Astrobiologia: À Procura de Vida Extraterrestre

A astrobiologia estuda as diversas formas de vida possíveis no contexto cósmico e sua evolução. É fundamental para entender a origem, distribuição e futuro da vida tanto na Terra como em meios extraterrestres (Carré et al., 2022; Cockell, 2015).

O conhecimento humano sobre a vida é limitado a fenômenos observáveis e medidos e, portanto, todas as definições sobre seres vivos, habitabilidade e condições ambientais extremas são geocêntricas. Estudar os extremos bióticos também é importante para avaliar a hipótese de panspermia, *i.e.*, a predição de que organismos podem sobreviver e serem transferidos de um planeta a outro, por exemplo por colisão de meteoritos e asteroides, até então em debate na comunidade científica (Paulino-Lima et al., 2010).

A vida, da forma como é conhecida nos diversos ecossistemas terrestres, é baseada em componentes orgânicos formados sobretudo por carbono, hidrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre (CHONPS). Também é necessária a presença de pelo menos uma fonte de energia como, por exemplo: o aquecimento pelo fluxo radiativo de uma estrela; fluxo de calor geotermal de atividade vulcânica; dissipação de calor por marés.

De maior importância em relação aos dois itens anteriores, a presença de um solvente em estado líquido é um fator chave para a origem e a manutenção da vida. Em particular, a água (H_2O) é a molécula de segunda maior abundância cósmica, atrás do hidrogênio molecular (H_2). Possui propriedades químicas e físicas, como o arranjo polar, que a permitem ser um solvente universal, bem como reactante e produto em diversas reações bioquímicas. Além disso, possui extrema importância no transporte de nutrientes e minerais e a ação como barreira física (Janot-Pacheco e da Fonseca, 2022).

A Figura 4.1, expõe os limites de temperatura (em $^{\circ}\text{C}$), pH, pressão (MPa) e salinidade (em porcentagem de NaCl) para os quais é observada a vida na Terra, tanto em culturas

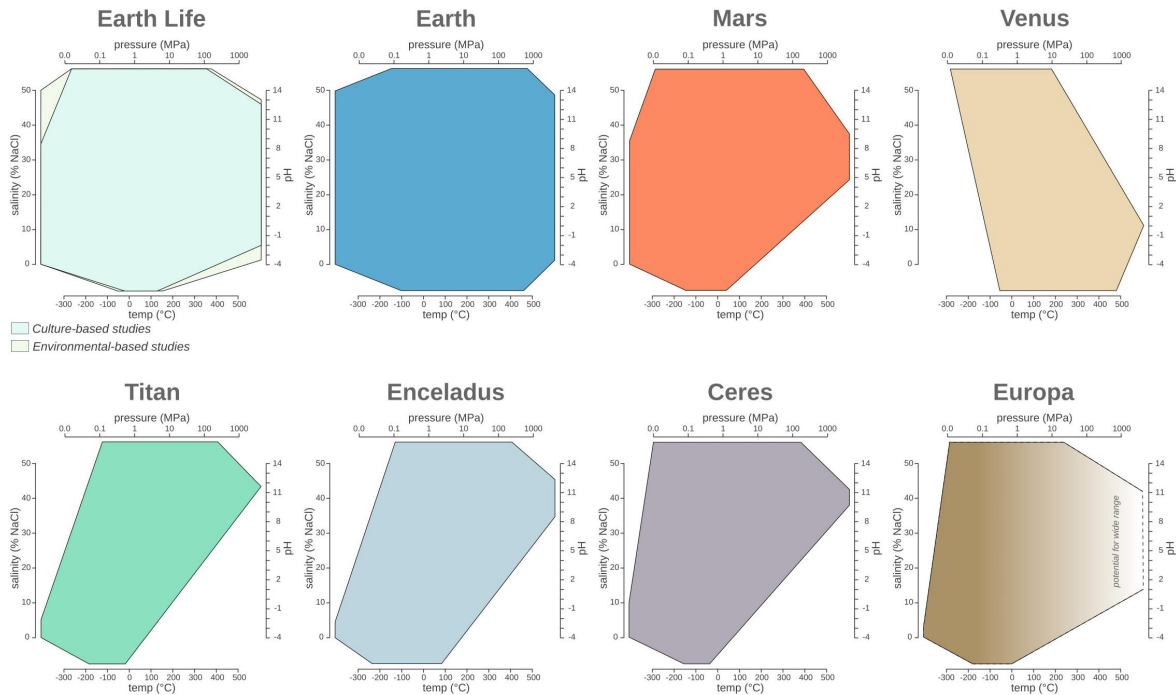


Figura 4.1: Os limites de pressão, pH, e salinidade em função da porcentagem de NaCl (em sentido horário iniciando de cima) observados para a vida na Terra e comparados aos de diferentes corpos planetários. Os gráficos em forma de polígono representam intervalos no espaço multidimensional. Cada borda representa o intervalo para uma variável em específico. Valores únicos (*e.g.*, quando o mínimo corresponde ao máximo), são retratados por um único vértice em um eixo, enquanto valores ausentes (NA ou NR) são descritos pela ausência da borda no eixo correspondente. Retirado de Merino et al. (2019).

como ambientes, e os compara com as condições físico-químicas da Terra, Marte, Vênus, Titan, Enceladus, Ceres e Europa, em ordem. Os polígonos representam intervalos em multidimensionais, e cada uma das bordas retrata um dos parâmetros. Um único vértice em um eixo representa valores únicos, e a inexistência de borda indica valores ausentes. As fronteiras deste “bioespaço” (Cockell, 2015) são dominadas por seres unicelulares extremófilos, explicitados na Seção 4.1.

4.1 Organismos Extremófilos

Os extremófilos terrestres são microorganismos, em sua maioria bactérias e arqueas, capazes de viver em ambientes com condições extremas, seja de temperatura (acima de 100 °C ou abaixo de 0 °C), pH (abaixo de 1 ou acima de 10, muito ácido ou muito alcalino, respectivamente), em condições de salinidade quase saturada ou de pressão (acima de 100 MPa) (Carré et al., 2022). Essas são condições extremamente distantes da zona de conforto de organismos mesofílicos como os seres humanos e grande parte dos seres multicelulares

com os quais convivemos. Os extremófilos ocupam praticamente todos os ambientes terrestres e participam de importantes ciclos biogeoquímicos, de modo que há indicadores de que a vida não é algo frágil como se considerada até há pouco (von Hegner, 2019), mas é um fenômeno robusto e prolífico, dadas algumas condições mínimas do ambiente.

A constatação de que os organismos extremófilos podem viver numa larga gama de condições físicas e químicas os tornam candidatos naturais a habitarem ambientes extra-terrestres inóspitos para o ser humano, como os oceanos interiores das luas dos planetas gigantes.

Na Tabela 4.1, são apresentadas a nomenclatura desses seres e as condições em que vivem. De maneira complementar, a Figura D.1 (Schröder et al., 2020) demonstra a taxa de crescimento de extremófilos em diferentes parâmetros ambientais.

Tabela 4.1 - Nomenclatura dos principais tipos de extremófilos e as condições nas quais vivem. Adaptado de Merino et al. (2019).

Baixo → Alto					
pH ¹	Hiperacidófilo < pH 3	Acidófilo < pH 5	Neutrófilo pH 5 - 9	Alcalifilo > pH 9	Hiperalcalifilo > pH 11
Temperatura ²		Psicrófilo < 20 °C	Mesófilo 20 - 45 °C	Termófilo 45 - 80 °C	Hipertermófilo > 80 °C
Salinidade ³		Não-halófilo < 1,2%	Halotolerante 1,2 - 2,9%; tolera ≤ 14,6%	Halófilo > 8,8 %	Halófilo Extremo < 14,6%; não cresce < 8,8%
Pressão ⁴			Piezotolerante/ Barotolerante 0,1 - 10 MPa	Piezófilo/ Barófilo 10 - 50 MPa	Hiperpiezófilo/ Hiperbarófilo > 50 MPa
Atividade de água ⁵			Xerófilo $a_w < 0,7$		

Na Figura D.2, são mostrados alguns ecossistemas terrestres de condições extremas, como: ambientes ártico e antártico (baixa temperatura); oceano profundo (baixa temperatura e alta pressão); cordilheiras meso-oceânicas e fontes hidrotermais (altas temperatura

¹ $0 < \text{pH} < 7$ representa um meio ácido; $\text{pH} = 7$, meio neutro; $7 < \text{pH} < 14$ ambiente básico.

² Considera-se temperaturas menores do que 20 °C baixas e altas acima de 45 °C.

³ É apresentada a salinidade em porcentagem da quantidade de cloreto de sódio (NaCl) por volume. O ambiente marinho terrestre possui salinidade de 3-4%, fontes termais de até 10,5% e lagos de soda até 37,1%.

⁴ A pressão atmosférica ao nível do mar (superfície da Terra) é de 0,1 MPa, ou 1 atm, sendo 1 atm $\approx 1 \cdot 10^5$ Pa.

⁵ A atividade de água é uma medida da água disponível no ambiente.

e pressão); fontes termais *hot springs* e gêiseres (alta temperatura, acidez); lagos de alta salinidade e alcalinos. Tais ambientes podem ser utilizados como análogos a planetas e luas e servir de local para desenvolvimento e testes de instrumentação para missões futuras de detecção de vida.

Um exemplo de sobrevivência ao extremo é a arquea metanogênica, capaz de produzir metano na ausência de oxigênio (Taubner et al., 2018), um microorganismo quimiorgano-trófico, isto é, que obtém energia para sobreviver de compostos químicos orgânicos. A Figura 4.2 mostra a fotografia eletrônica da espécie *Methanothermococcus okinawensis*, isolada de uma fonte hidrotermal do oceano profundo.

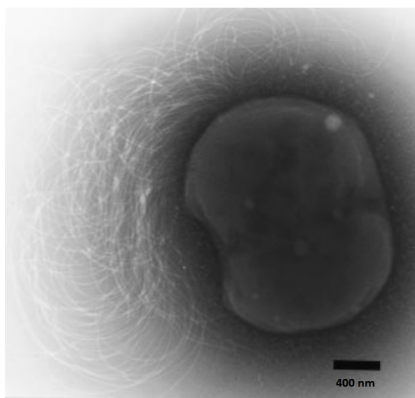
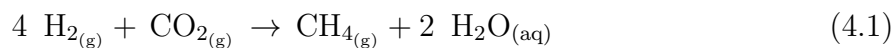


Figura 4.2: Micrografia eletrônica da arquea metanogênica *Methanothermococcus okinawensis* colorida negativamente na fase exponencial média de crescimento. O feixe polar de flagelos é observado. A barra representa a escala de 400 nanômetros. Retirada de Takai et al. (2002).

A reação da metanogênese realizada pela *M. okinawensis*, envolvendo a produção de gás metano (CH_4) e água (H_2O) a partir de hidrogênio molecular (H_2) e gás carbônico (CO_2), está a seguir:



O Apêndice D traz mais informações sobre seres extremófilos, incluindo mais exemplos como a bactéria *Deinococcus radiodurans*, resistente a grandes doses de radiação, e os tardígrados. No entanto, ainda iremos estender a análise de extremófilos na continuidade da pesquisa.

4.2 Análogo Terrestre: Fontes Hidrotermais Oceânicas

As fontes hidrotermais oceânicas são um exemplo de vulcanismo que aparece em áreas nas quais as placas tectônicas terrestres se aproximam e o magma sobe até a superfície, ou próximo, do fundo do mar. A água do mar se infiltra no manto terrestre através de rachaduras e rochas porosas, sendo então aquecida pelo magma. Assim, reações químicas ocorrem na rocha, transformando a água ao redor em um ambiente quente, ácido ou alcalino. A reação geoquímica de modificação de silicatos contendo ferro e magnésio (Fe-Mg), como a olivina, em minerais de serpentina é denominada serpentinização. Como resultado, gases metano (CH_4) e hidrogênio molecular (H_2) são liberados na água, fontes de energia que podem ser utilizadas por organismos quimiossintéticos. Tais ecossistemas de serpentinização são importantes análogos para ecossistemas supostos de terem existido na Terra e Marte primitivos (Schulte et al., 2022).

A precipitação de minerais forma torres de estruturas similar a chaminés. As chaminés brancas (Figura 4.3) são as melhores analogias para os satélites em estudo neste projeto. Com temperaturas de cerca de $90\text{ }^\circ\text{C}$ e pH alcalino na faixa 9-11, há liberação de CH_4 e H_2 . São ecossistemas dominados pelo grupo de arqueas metanogênicas da ordem *Methanosarcinales* (Judge, 2017; Kotlarz et al., 2020).

Por outro lado, as chaminés pretas (Figura 4.4) são um ambiente ácido, de temperaturas na ao redor de $350\text{ }^\circ\text{C}$ e com a emissão de gás carbônico (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S) e alguns metais.

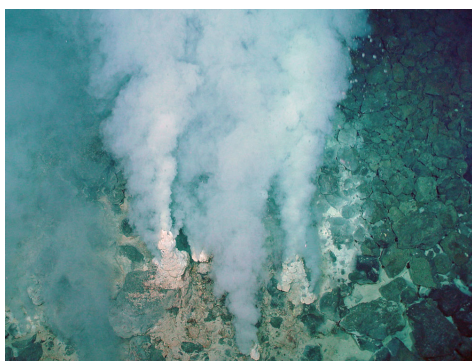


Figura 4.3: Chaminé branca noanel de fogo submarino no Arco das Marianas. NOAA.

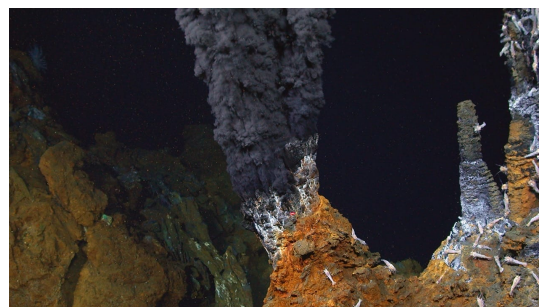


Figura 4.4: Chaminé hidrotermal preta, demonstrando a biodiversidade presente neste ambientes. WHOI.

Por terem altas temperaturas, as regiões próximas ao fluxo hidrotermal são um cenário para uma teia alimentar única (Figura 4.5), a qual é mantida por microorganismos, como bactérias e arqueas, que obtêm energia por reações como a metanogênese (Equação 4.1) e

produzem substâncias orgânicas. Este ecossistema suporta uma rica fauna, incluindo seres multicelulares como crustáceos, polvos, moluscos e pequenos peixes.



Figura 4.5: Fauna das fontes hidrotermais, com crustáceos e moluscos. NOAA Photo Library.

A análise de ambientes terrestres análogos às luas é de extrema importância já que, a partir deles, são criados modelos de habitabilidade das mesmas utilizando dados obtidos pelas sondas. Ainda, podem ser utilizados para desenvolvimento e teste de missões futuras para detectar vida.

4.3 Habitabilidade em Luas do Sistema Solar

Os locais mais potencialmente habitáveis de Enceladus e Europa são as fontes hidrotermais oceânicas e sua proximidade (Kotlarz et al., 2020; Zalewska e Kotlarz, 2019). Por seu tamanho pequeno em relação a outras luas de Júpiter e Saturno, Enceladus é o que possui condições de pressão e temperatura no fundo do oceano mais próximas às da Terra e, portanto, é o caso ideal para simulações em laboratório (Barge e White, 2017).

Nas duas luas, é considerável notar que a crosta de gelo age como uma barreira física contra raios cósmicos e sobretudo contra a radiação ultravioleta (UV) proveniente do Sol, nociva à vida na Terra (Carré et al., 2022).

Por outro lado, Europa pode ser o único corpo no Sistema Solar, além da Terra, exibindo tectônica e subducção de placas, neste caso de gelo. A movimentação de placas pode ocasionar o transporte de substâncias da superfície para o oceano, como oxidantes produzidos por fotoionização ou moléculas prebióticas conduzidas por cometas e meteoritos, contribuindo para condições de habitabilidade.

A Tabela 4.2 mostra um resumo das principais características químicas e físicas de

Enceladus e Europa.

Tabela 4.2 - Principais características químicas e físicas de Enceladus e Europa.

Parâmetro	Enceladus	Europa
Profundidade do oceano	20-50 km	100 km
Espessura da camada de gelo	10-30 km	3-30 km
Composição química	Plumas: H ₂ O (91%), CO ₂ , NH ₃ , CH ₄ , H ₂ , H ₂ S, CH ₃ OH, HCN, NaCl, Na ₂ CO ₃ , NaHCO ₃ , KCl, MgCl ₂ , compostos com P	H ₂ O (81%), MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, CO ₂ , íons Ca ²⁺ e HCO ₃ ⁻
pH	11-12 (alcalino)	Alcalino próximo a fontes hidrotermais
Energia térmica (marés)	15,8 GW	1600 GW
Referências	Choblet et al. (2017); Hao et al. (2022); JPL (2021); Taubner et al. (2018); Zeng e Jansen (2021)	Carré et al. (2022); Lesage et al. (2021); Melwani Daswani et al. (2021)

Em Taubner et al. (2018), foi analisada a produção de metano (CH₄) biológico em um ambiente de parâmetros de temperatura, pressão, composição química e pH extrapolados a Enceladus. Demonstrou-se que a arquea metanogênica da espécie *Methanothermococcus okinawensis* (Figura 4.2) cresceu de maneira estável e reprodutível em diferentes misturas de gases e sem fases estendidas de latência. A possível fonte principal de hidrogênio molecular (H₂) em Enceladus é a oxidação de ferro em decorrência da serpentinização da olivina no núcleo da lua. Por modelos computacionais cinéticos e termodinâmicos, deve haver produção suficiente de H₂ para ser utilizada por microorganismos na metanogênese (Equação 4.1). O estudo conclui que, não só *M. okinawensis* poderia sobreviver em um ambiente como Enceladus, como também é aceitável estimar que parte do CH₄ detectado nas plumas seja produzido por atividades biológicas.

Tabela 4.3 - Algumas espécies e ordens de arqueas e bactérias cujos parâmetros de sobrevivência encontram as condições ambientais próximas a fontes hidrotermais oceânicas de Enceladus e Europa.

Organismo	Classificação	Sobrevivência	Referência
<i>Methanothermococcus okinawensis</i>	Arquea	Alta temperatura; alta pressão; metanogênica	Experimento de Taubner et al. (2018)
Ordem <i>Methanosarcinales</i>	Arquea	Alta temperatura; pH alcalino; alta salinidade; metanogênica	Judge (2017); Kotlarz et al. (2020)
<i>Thermococcus piezophilus</i>	Arquea	Alta temperatura; alta pressão; anaeróbica; quimiorganotrófica	Carré et al. (2022)
Gênero <i>Bacillus</i>	Bactéria	Alta temperatura; pH alcalino; alta salinidade	Carré et al. (2022)
<i>Clostridium tepidiprofundum</i>	Bactéria	Temperaturas moderadas; anaeróbica	Carré et al. (2022)
<i>Pelagibacter ubique</i>	Bactéria	Baixa abundância de nutrientes; muito abundante nos oceanos terrestres	Carré et al. (2022)

A Tabela 4.3 mostra grupos de arqueas e bactérias que poderiam sobreviver em Enceladus e Europa, sob o ponto de vista teórico a partir dos ambientes nos quais eles habitam na Terra. Deve ser considerado que, devido à profundidade de seus oceanos, as fontes hidrotermais nas luas devem ter pressão hidrostática muito maior do que suas análogas terrestres, de modo que a previsão de sobrevivência de alguns extremófilos terrestres é apenas uma estimativa.

O tempo de duração de vida de arqueas e bactérias é, em geral, de alguns dias; no entanto, por possuírem uma alta taxa de reprodução, essas populações são de milhares ou bilhões de organismos em cada instante, podendo ser consideradas estáveis e inesgotáveis.

O estudo de seres extremófilos será complementado na continuidade do projeto de Iniciação Científica.

Conclusões e Perspectivas

Imensos progressos foram feitos nos conhecimentos do ser humano sobre as grandes luas dos gigantes gasosos do Sistema Solar, graças sobretudo às missões espaciais das últimas décadas. Aprendemos com elas que existe uma nova fronteira para a habitabilidade, pois os oceanos interiores, comuns nessas luas, ou mesmo superficiais, apresentam condições químicas e físicas similares a alguns ecossistemas terrestres.

As luas Enceladus, de Saturno, e Europa, de Júpiter, são potencialmente habitáveis, especialmente próximo às fontes hidrotermais no fundo do oceano, onde poderiam sobreviver, por suposição, algumas espécies de microorganismos extremófilos, como arqueas e bactérias. Pretendemos estender essa análise na continuidade do projeto.

Para além de registrar as descobertas já feitas com as sondas espaciais, sobretudo a *Galileo* e a *Cassini-Huygens*, é relevante citar as missões em fase de planejamento que auxiliarão a compreender melhor os “mundos oceânicos” em um futuro próximo.

A missão JUICE (*Jupiter ICy moons Explorer*), da agência espacial europeia ESA, tem lançamento planejado para 2023 e chegará ao sistema de Júpiter em 2029. Irá mapear emissões e interações dos vulcões de Io para Europa, bem como obterá detalhes sobre a possibilidade da existência de oceanos subsuperficiais também em Calisto e Ganimedes, terminando por se colocar em órbita ao redor do último em 2032, que é a única lua a possuir um campo magnético próprio.

Já a *Europa Clipper*, a ser lançada pela NASA em 2024, fará diversos *flybys* nos satélites galileanos. Em particular, um magnetômetro analisará como o oceano de Europa interage com o campo magnético de Júpiter e medirá sua profundidade e salinidade, um parâmetro importante para a análise da potencial habitabilidade da lua. Além disso, há um coletor de poeira para ser aplicado junto a um espectrômetro de massa, seguindo experiências do

recolhimento de material das plumas de Enceladus pela *Cassini* (Coelho e Martins, 2020).

Para o sistema de Saturno, está programada para 2027 a missão *Dragonfly*, composta de um helicóptero e *lander* enviado para a superfície de Titan, que inclui um equipamento para acompanhamento de sismos e condições meteorológicas.

Ainda pode ser citado o telescópio espacial *James Webb* (JWST), que foi lançado em 2021, e será utilizado para imageamento e espectroscopia, sobretudo da atividade geológica de Europa, além das contribuições já efetuadas pelo *Hubble*.

Em 2021, através do observatório ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) no Chile, detectou-se pela primeira vez a presença de um disco circumplanetário fora do Sistema Solar (Benisty et al., 2021), visto na Figura 5.1. Tal fenômeno ocorre no sistema da estrela PDS 70, cerca de 400 anos-luz de distância da Terra, com dois planetas confirmados: PDS 70c e PDS 70b. O primeiro é um planeta do tipo Júpiter, de dimensões próximas ao gigante gasoso, com um disco de tamanho comparável à distância Sol-Terra e de massa suficiente para formar até três satélites do tamanho da Lua.

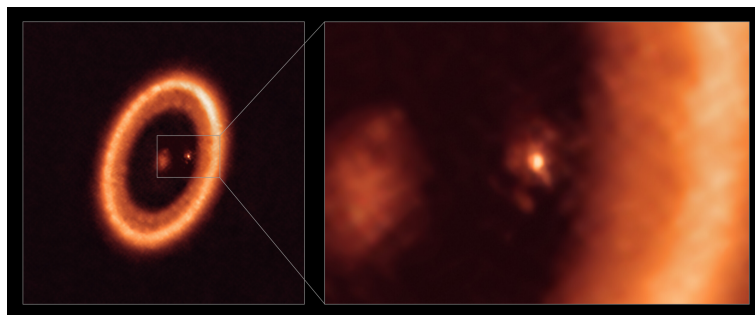


Figura 5.1: À esquerda, sistema estelar PDS 70. À direita o planeta PDS 70c, do tipo Júpiter, no qual há um disco circumplanetário e a provável formação de exoluas. ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Benisty et al. (2021).

Além disso, em uma análise recente de observações de trânsito planetário com o telescópio espacial *Kepler*, foi aparentemente identificada uma exolua orbitando um planeta também do tamanho de Júpiter. Um estudo mais detalhado ainda é necessário para validar ou rejeitar a candidata Kepler-1708 b-i (Kipping et al., 2022). Trata-se de uma detecção difícil, mas espera-se que futuros satélites com novas técnicas possam melhorar esse cenário. Um exemplo próximo é o o PLATO (*PLANetary Transits and Oscillations of stars*), da agência espacial europeia ESA, e do qual o Brasil participa, com astrofísica e engenharia. Será lançado em 2026, e suas modernas técnicas fotométricas permitirão, através de um tratamento de dados apropriado, melhorar bastante a possibilidade de detecção de luas de

exoplanetas gasosos.

Em resumo, a abertura dessa nova perspectiva, da possibilidade de microorganismos muito diferentes de nós, *eucariotos* terrestres, poderem existir em luas de gigantes gasosos fora da Zona Habitável circunstelar, ocorre também em satélites de exoplanetas, ampliando assim, essa nova fronteira de habitabilidade através de toda a Via Láctea.

Referências Bibliográficas

- Ashkenazy Y., Tziperman E., Dynamic Europa ocean shows transient Taylor columns and convection driven by ice melting and salinity, *Nat. Commun.*, 2021
- Barge L. M., White L. M., Experimentally testing hydrothermal vent origin of life on Enceladus and other icy/ocean worlds, *Astrobiology*, 2017
- Benisty M., Bae J., Facchini S., Keppler M., Teague R., Isella A., Kurtovic N. T., Pérez L. M., Sierra A., Andrews S. M., Carpenter J., Czekala I., Dominik C., Henning T., Menard F., Pinilla P., Zurlo A., A Circumplanetary Disk around PDS70c, *ApJL*, 2021
- Bland M. T., Becker T. L., Edmundson K. L., Roatsch T., Archinal B. A., Takir D., Patterson G. W., Collins G. C., Schenk P. M., Pappalardo R. T., Cook D. A., A New Enceladus Global Control Network, Image Mosaic, and Updated Pointing Kernels From Cassini's 13-Year Mission, *Earth Space Sci.*, 2018
- Carré L., Zaccai G., Delfosse X., Girard É., Franzetti B., Relevance of Earth-Bound Extremophiles in the Search for Extraterrestrial Life, *Astrobiology*, 2022
- Cavalié T., Hue V., Hartogh P., Moreno R., Lellouch E., Feuchtgruber H., Jarchow C., Cassidy T., Fletcher L. N., Billebaud F., Dobrijevic M., Rezac L., Orton G. S., Rengel M., Fouchet T., Guerlet S., Herschel map of Saturn's stratospheric water, delivered by the plumes of Enceladus, *A&A*, 2019
- Choblet G., Tobie G., Sotin C., Běhouňková M., Čadež O., Postberg F., Souček O., Powering prolonged hydrothermal activity inside Enceladus, *Nat. Astron.*, 2017
- Cockell C. S., *Astrobiology: understanding life in the universe*. Wiley Blackwell, 2015

- Coelho L. F., Martins Z., The Geochemistry of Icy Moons, Encyclopedia of Geology, 2020
- Ferraz-Mello S., *Caos e Planetas: Dinâmica Caótica de Sistemas Planetários* 1 edn. Editora Livraria da Física, 2022a
- Ferraz-Mello S., *Dynamic of the Galilean Satellites: An Introductory Treatise* 2 edn. Universidade de São Paulo, 2022b
- Filho K. S. O., Saraiva M. F. O., *Astronomia & Astrofísica* 4 edn. Editora Livraria da Física, 2017
- Folonier H. A., Ferraz-Mello S., Andrade-Ines E., Gomes G. O., Tidal Dissipation and Forced Libration in Enceladus. In EPSC-DPS Joint Meeting , 2019
- Greenberg R., *Unmasking Europa: The Search for Life on Jupiter's Ocean Moon*. Copernicus Books, 2008
- Hansen C. J., Esposito L. W., Hendrix A. R., Ultraviolet observation of Enceladus' plume in transit across Saturn, compared to Europa, Icarus, 2019
- Hao J., Glein C. R., Huang F., Yee N., Catling D. C., Postberg F., Hillier J. K., Hazen R. M., Abundant phosphorus expected for possible life in Enceladus's ocean, PNAS, 2022
- Hemingway D., Iess L., Tajeddine R., Tobie G., The interior of Enceladus, Enceladus and the icy moons of Saturn, 2018
- Henin B., *Exploring the Ocean Worlds of Our Solar System*. Springer Cham, 2018
- Hesse M. A., Jordan J. S., Vance S. D., Oza A. V., Downward Oxidant Transport Through Europa's Ice Shell by Density-Driven Brine Percolation, Geophys. Res. Lett., 2022
- IAU-WGPSN, n.d. Planet and Satellite Names and Discoverers. Gazetteer of Planetary Nomenclature Acesso em 17 de Janeiro de 2022, de <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/Planets>
- Ingersoll A. P., Inertial Taylor columns and Jupiter's great red spot, J. Atmos. Sci., 1969
- Ingersoll A. P., Ewald S. P., Decadal timescale variability of the Enceladus plumes inferred from Cassini images, Icarus, 2017

- Ingersoll A. P., Ewald S. P., Trumbo S. K., Time variability of the Enceladus plumes: Orbital periods, decadal periods, and aperiodic change, *Icarus*, 2020
- Itaipu Binacional, n.d. Perguntas Frequentes Acesso em 26 de Março de 2021, de <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>
- Ito T., Malhotra R., Asymmetric impacts of near-Earth asteroids on the Moon, *A&A*, 2010
- Jacobs S., The Taylor column problem, *J. Fluid Mech.*, 1964
- Janot-Pacheco E., da Fonseca V. B., Habitabilidade em luas de sistemas planetários: uma nova fronteira, *Cadernos de Astronomia*, 2022
- JPL, 2014 Color Maps of Enceladus - 2014 Acesso em 25 de Agosto de 2022, de <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia18435-color-maps-of-enceladus-2014>
- JPL, 2021 Enceladus the Powerhouse Acesso em <https://www.jpl.nasa.gov/images/enceladus-the-powerhouse>
- JPL, n.d. Enceladus. NASA Solar System Exploration Acesso em 11 de Março de 2021, de <https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/enceladus/by-the-numbers/>
- Judge P., A novel strategy to seek biosignatures at Enceladus and Europa, *Astrobiology*, 2017
- Kipping D., Bryson S., Burke C., Christiansen J., Hardegree-Ullman K., Quarles B., Hansen B., Szulágyi J., Teachey A., An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b, *Nat. Astron.*, 2022
- Kotlarz J., Zielenkiewicz U., Zalewska N., Kubiak K., Microbial component detection in Enceladus snowing phenomenon, *Astrophys. Bull.*, 2020
- Lesage E., Schmidt F., Andrieu F., Massol H., Constraints on effusive cryovolcanic eruptions on Europa using topography obtained from Galileo images, *Icarus*, 2021
- Lunine J. I., Ocean worlds exploration, *Acta Astronaut.*, 2017
- Melwani Daswani M., Vance S. D., Mayne M. J., Glein C. R., A metamorphic origin for Europa's ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 2021

- Merino N., Aronson H. S., Bojanova D. P., Feyhl-Buska J., Wong M. L., Zhang S., Giovannelli D., Living at the extremes: extremophiles and the limits of life in a planetary context, *Front. Microbiol.*, 2019
- NASA, 2016 Solar System Small Worlds Fact Sheet Acesso em 17 de Janeiro de 2022, de https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/galileanfact_table.html
- NASA, 2018 Jovian Satellite Fact Sheet Acesso em 17 de Janeiro de 2022, de <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/joviansatfact.html>
- NASA, 2019 Saturnian Satellite Fact Sheet Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/saturniansatfact.html>
- NASA, 2021a Earth Fact Sheet Acesso em 18 de Janeiro de 2022, de <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
- NASA, 2021b Moon Fact Sheet Acesso em 18 de Janeiro de 2022, de <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>
- NRAO e Mangum, J., 2013 What Happens as the Moon Moves Away from the Earth? National Radio Astronomy Observatory Acesso em 16 de Março de 2022, de <https://public.nrao.edu/ask/what-happens-as-the-moon-moves-away-from-the-earth/>
- Núñez P. G., Peña-Salinas M. E., Vázquez R., How can tardigrades survive in other moons like Enceladus?. In 51st LPSC , 2019
- Olsson-Francis K., Billi D., Teske A., De Vera J.-P. P., Habitability Beyond Earth, *Front. Microbiol.*, 2018
- Paulino-Lima I. G., Pilling S., Janot-Pacheco E., de Brito A. N., Barbosa J. A. R. G., Leitão A. C., Lage C. d. A. S., Laboratory simulation of interplanetary ultraviolet radiation (broad spectrum) and its effects on *Deinococcus radiodurans*, *P&SS*, 2010
- Picazzio E., Terra e Lua. In Planetas e Sistemas Planetários [Notas de Aula] , 2019
- Rhoden A. R., Hurford T. A., Spitale J., Henning W., Huff E. M., Bland M. T., Sajous S., The formation of Enceladus' Tiger Stripe Fractures from eccentricity tides, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2020

- Schoenfeld A., Yin A., Leonard E., A dust-devil-like vortex in Enceladus' ocean: a model for rapid transport of hydrothermal products from ocean floor to erupting ice-shell fractures. In 51st Annual LPSC , 2020
- Schröder C., Burkhardt C., Antranikian G., What we learn from extremophiles, Chem-Texts, 2020
- Schulte M., Blake D., Hoehler T., McCollom T., Serpentinization and its implications for life on the early Earth and Mars, Constraints, 2022
- Shapiro R., , 2007 in , Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology 1 edn, Cambridge University Press
- Takai K., Inoue A., Horikoshi K., *Methanothermococcus okinawensis* sp. nov., a thermophilic, methane-producing archaeon isolated from a Western Pacific deep-sea hydrothermal vent system., Int. J. Syst. Evol., 2002
- Taubner R.-S., Pappenreiter P., Zwicker J., Smrzka D., Pruckner C., Kolar P., Bernacchi S., Seifert A. H., Krajete A., Bach W., et al., Biological methane production under putative Enceladus-like conditions, Nat. Commun., 2018
- Teolis B. D., Perry M. E., Hansen C. J., Waite J. H., Porco C. C., Spencer J. R., Howett C. J., Enceladus plume structure and time variability: Comparison of Cassini observations, Astrobiology, 2017
- Vid'machenko A., Morozhenko A., Klyanchin A., Shavlovskiy V., Kostogryz N., et al., Asymmetry of reflective properties of the hemispheres of Jupiter satellite Europa, Astronomical School's Report, 2011
- von Hegner I., An ab initio definition of life pertaining to Astrobiology, Unpublished, 2019
- Walker J., Halliday D., Resnick R., , 2009 in , Vol. 2, Fundamentos de Física. LTC
- Zalewska N., Kotlarz J., Microbial component detection in Enceladus. In EPSC-DPS Joint Meeting 2019 , 2019
- Zeng Y., Jansen M. F., Ocean circulation on enceladus with a high-versus low-salinity ocean, Planet. Sci. J., 2021

Zhang K., Nimmo F., Internal structure of Enceladus and Dione from Orbital constraints.
In 40th Annual LPSC , 2009

Apêndice

Apêndice A

Dinâmica Orbital

Definições relevantes para as Seções B.1 e C.1 decorrem da rotação síncrona de um satélite, como mostra a Figura A.1. Nesta situação, o satélite sempre tem a mesma face visível e a outra oculta de um observador localizado em seu planeta principal. Ainda, de acordo com a orientação do movimento orbital e a 90° da face visível, em sentido horário, é estabelecido o hemisfério, ou face, dianteiro (tradução livre do inglês *leading hemisphere*), a metade da lua que aponta para a “frente”. O lado oposto é denotado hemisfério posterior (*trailing hemisphere*).

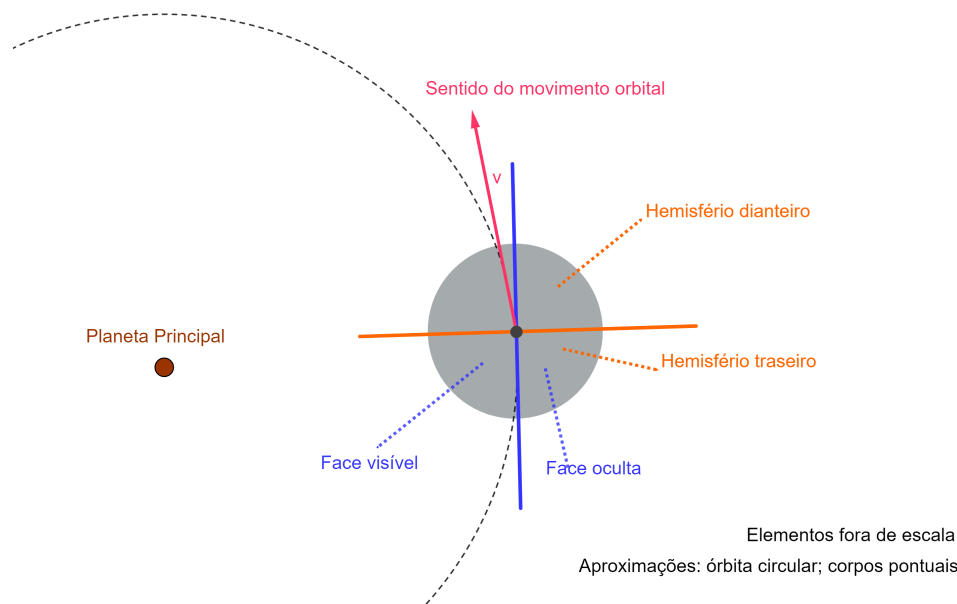


Figura A.1: Representação de um satélite com período de revolução equivalente ao de translação ao redor do planeta principal, em decorrência do travamento por marés. São indicadas as faces visível e oculta ao planeta principal, bem como os hemisférios dianteiro e posterior, em relação ao sentido do movimento orbital. A figura está fora de escala, e representa uma situação apenas ilustrativa. Produzida pela autora no site GeoGebra ([geogebra.org/geometry](https://www.geogebra.org/geometry)).

Enceladus

B.1 Dinâmica Orbital

Os satélites Enceladus e Dione estão bloqueados em uma ressonância orbital de comensurabilidade 2:1, *i.e.*, enquanto o primeiro faz duas revoluções ao redor de Saturno, o segundo realiza precisamente uma. Ressonâncias orbitais, sejam elas antigas ou correntes, têm o potencial de aumentar a excentricidade da órbita, e como resultado produzir maior ou menor deformação dos corpos por maré. Tais mudanças geram fricção entre as distintas camadas (núcleo, manto, oceano, crosta), produzindo dissipação de calor (Greenberg, 2008; Zhang e Nimmo, 2009). Aponta-se que, em consequência da dissipação por marés, os dois corpos estão muito próximos a um movimento periódico estável (Ferraz-Mello, 2022a).

Uma vez acionado por algum fenômeno de ressonância orbital, o aquecimento de Enceladus pode se tornar autossustentável e durar por um longo período. Tal ocorrência favorece a existência de um oceano interno, é consistente com as plumas e a libração (cerca de $0,120(14)^\circ$) ao redor da rotação síncrona (Folonier et al., 2019). Além disso, oscilações de maré em Enceladus podem ser ocasionadas pela excentricidade de 0,056 da órbita de Saturno e sua obliquidade de 27° em relação ao plano da eclíptica (Ingersoll e Ewald, 2017).

Modelos de Ingersoll e Ewald (2017) sugerem que as *Tiger Stripes* estão mais abertas no apocentro, ou seja, o ponto da órbita de Enceladus mais distante de Saturno, e mais estreitas no pericentro. Esta situação pode ser descrita por princípios de Mecânica dos Fluidos (Walker et al., 2009), uma vez que as plumas são compostas por gases e líquidos, além de partículas de gelo. A equação da continuidade define que, para o escoamento laminar em um tubo de espessura variável, a velocidade de um fluido está relacionada com a área de secção reta pela qual ele escoar. Assim, para trechos arbitrários 1 e 2 de um tubo,

é válido que:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2, \quad (\text{B.1})$$

em que A_1 e A_2 são as áreas de seção reta e v_1 e v_2 as velocidades do fluido em cada um dos fragmentos (Figura B.1).

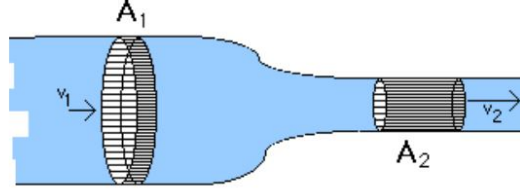


Figura B.1: Esquema da dinâmica de escoamento de fluidos, com A_1 e A_2 as áreas de seção reta e v_1 e v_2 as velocidades do fluido em cada um dos fragmentos. Produzida por: Carlos Bertulani/IF UFRJ.

A vazão R_v , isto é, o fluxo de material que percorre o tubo, é constante pela conservação de massa, podendo ser associada à área e à velocidade do fluido em cada trecho:

$$R_v = A \cdot v \quad (\text{B.2})$$

Aplicando estes princípios para Enceladus na posição do apocentro, em que as *Tiger Stripes* estão mais abertas, ou seja, a seção reta pela qual os fluidos escoam é maior, a velocidade do jato expelido será menor. Da mesma maneira, com as rachaduras mais estreitas durante o pericentro da órbita, a velocidade das partículas na pluma será maior. Esta previsão é observada no satélite (Henin, 2018; Ingersoll e Ewald, 2017).

A Figura B.2 mostra as plumas capturadas pela sonda *Cassini* em três datas distintas, demonstrando sua variabilidade.

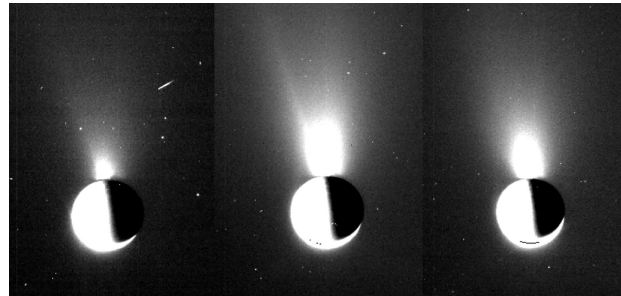


Figura B.2: Variação das plumas em 2017: 18 de junho, 02 de agosto e 28 de agosto. Retirado de Ingersoll et al. (2020).

Sob outra perspectiva, Ingersoll e Ewald (2017) também demonstraram que a amplitude da pluma decresceu por uma constante multiplicativa durante a década de 2005-2015. Os

dados foram separados em períodos de observação: 2005-2009 (azul escuro), 2009-2010 (azul claro), 2011-2012 (laranja) e 2012-2015 (rosa), como visto na Figura B.3. As curvas de densidade têm formatos parecidos, com maiores intensidades próximas ao apocentro da órbita (180°); Ingersoll et al. (2020).

Os dados de anomalia média, em graus, foram utilizados como medida de tempo, visto que este ângulo localiza o corpo celeste em sua órbita, por definição. A densidade de *slab*, em kg/km, foi estabelecida pelos autores como a densidade em massa de partículas em um plano horizontal, estendido ao infinito, a 100 km de altura do Polo Sul de Enceladus.

Além disso, fizemos uma análise da variação de excentricidade e da órbita, através de dados de Δr , distância do corpo no apocentro relativa ao seu pericentro, e da relação para as elipses de $\Delta r = 2ae$, sendo a o semieixo maior. O resultado está na Figura B.4. As diferenças na excentricidade são decorrência de diversas perturbações, incluindo Saturno e Dione, por exemplo, mas estendendo-se aos corpos menores e/ou mais distantes, por se tratar de um problema de interação gravitacional de N-corpos.

Ainda, há a possibilidade de que a variação temporal das plumas possa ser resultante não apenas da flutuação da massa das mesmas, mas também por diferentes propriedades das partículas expelidas (Ingersoll e Ewald, 2017).

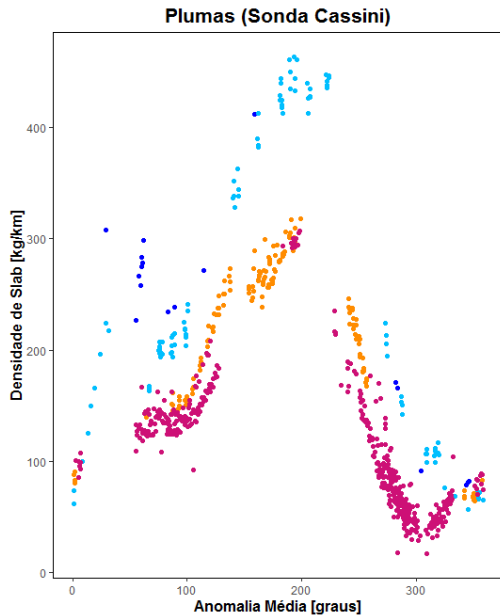


Figura B.3: Dados de Ingersoll et al. (2020), para a variação da intensidade das plumas.

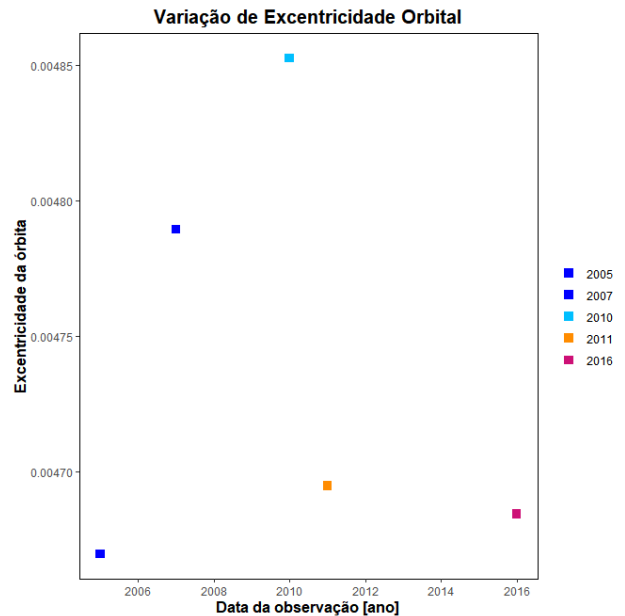


Figura B.4: Variação da excentricidade orbital de Enceladus. Dados de Δr de Ingersoll et al. (2020).

B.2 Superfície

Na Figura B.5 é apresentado o mapa da superfície de Enceladus. Há crateras de impacto sobretudo nas regiões dos meridianos de 0 e 180°. Além disso, as regiões de longitudes 180-360° possuem mais rachaduras e são mais acidentadas, revelando uma atividade geológica diferencial entre os hemisférios traseiro e dianteiro. Também ocorre assimetria nos hemisférios de Europa, conforme exposto na Seção C.2.

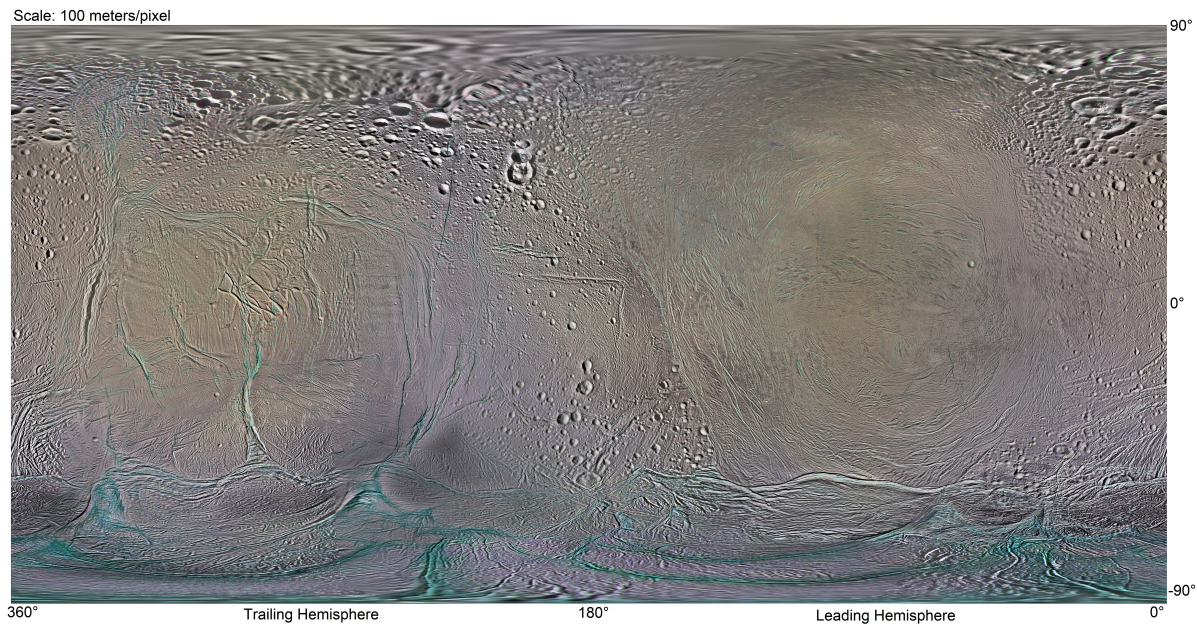


Figura B.5: Mapa em cores, indicando as regiões dos hemisférios dianteiro e traseiro, à direita e à esquerda, respectivamente. Os tons amarelados e rosados são supostamente decorrentes da diferença de espessura da superfície. Muitas das fraturas geológicas mais recentes possuem traços mais evidentes em ultravioleta, *i.e.*, são mais brilhantes, como a região das *Tiger Stripes* (JPL, 2014). A resolução da projeção cilíndrica é de 100 metros por pixel. Adaptada de: NASA/JPL-Caltech/SSI/Lunar and Planetary Institute.

Bland et al. (2018) indicam, por um mapeamento em infravermelho, que a região ao longo das *Tiger Stripes* revela terrenos de gelo cristalino e recente. Embora o motivo para a diferença de atividade geológica nos polos Norte e Sul não seja totalmente entendido, foi obtido que estresses por marés de excentricidade orbital poderiam produzir fraturas de orientações similares vistas (Rhoden et al., 2020).

B.3 Dinâmica Oceânica; Atividade Crio vulcânica

Partículas nanométricas de sílica (SiO_2) foram capturadas na magnetosfera de Saturno, e sua origem mais provável é a atividade hidrotermal no fundo oceânico de Enceladus.

Além disso, o fluxo expelido de grãos desse tamanho escapa da gravidade do satélite e é capturado pelos campos elétrico e magnético do planeta principal, muito intensos e gerados a partir do movimento de fluidos em seu interior. Esses grãos fornecem, então, material para a constituição do anel E, o de maior distância ao planeta (Figura E.4). Todavia, grãos de tamanho micrométrico caem na superfície do satélite, como neve (Teolis et al., 2017; Kotlarz et al., 2020). Ainda, Cavalié et al. (2019) demonstraram por observações da *Cassini* e do observatório espacial *Herschel* (ESA) que Enceladus é a origem principal da água presente na estratosfera de seu planeta. Tal distribuição não é uniformemente misturada conforme a latitude, mas é mais intensa no equador e decresce como uma Gaussiana no sentido dos polos.

No estudo de Schoenfeld et al. (2020), o aquecimento por marés provoca um fluxo poloidal crescente de produtos do fundo do oceano para as plumas. Além disso, a rotação do satélite ao redor de Saturno produz um excesso de pressão nos fluidos, e a influência das forças centrífuga e de Coriolis podem causar um movimento toroidal no sentido anti-horário. Como resultado, estes fatores favorecem a ocorrência de um vórtice “demônio de poeira”. A estrutura mostrada na Figura B.6 é um funil e, conforme simulações, o deslocamento de materiais pela coluna oceânica de Enceladus ocorre em menos de um ano.

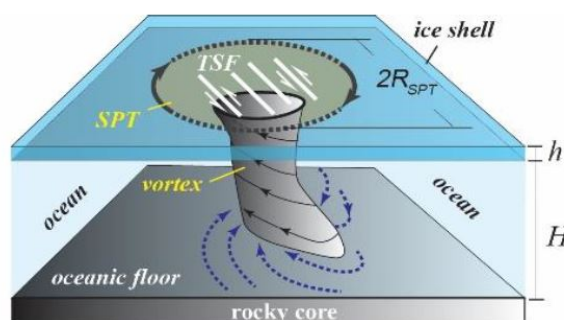


Figura B.6: Representação do vórtice inferido abaixo do polo Sul (*South Polar Terrain* - SPT). As partículas são ejetadas através das rachaduras (*Tiger Stripes Fractures* - TSF). A água aquecida pelas fontes hidrotermais no solo oceânico tem trajeto ascendente e circular, e a água fria descende para fora do centro do vórtice. O oceano possui profundidade H e a camada de gelo espessura h . Retirada de Schoenfeld et al. (2020).

Apêndice C

Europa

C.1 Dinâmica Orbital

O processo evolutivo do sistema de satélites galileanos ainda é uma questão em aberto. Há ressonância nos períodos orbitais entre Ganimedes, Europa e Io de 1:2:4, denotada ressonância de Laplace, que produz efeitos de maré gravitacional sobre as luas, incluindo uma excentricidade forçada. Tal fenômeno é estável e, por ser periódico, seus efeitos são cumulativos e intensos em cada satélite abrangido. Entretanto, ao analisar esta dinâmica, além das ações perturbadoras entre os satélites, é necessário considerar, por exemplo, efeitos de outros planetas que podem afetar os movimentos de Júpiter, como Saturno, com o qual está em uma atividade quase ressonante (Ferraz-Mello, 2022b).

Como previamente citado, os efeitos de maré no satélite são intensos, já que a distorção ocasionada por Júpiter atinge cerca de 1 km do globo de 3300 km de diâmetro. Por comparação, a Terra sofre alongamento de apenas alguns metros em seu diâmetro de 13000 km (Greenberg, 2008).

C.2 Superfície

A Figura C.1 exibe o mapeamento da superfície do satélite. O hemisfério dianteiro é mais brilhante, *i.e.*, possui albedo maior, e menor concentração de material “poluente” além do gelo. Isto é indicativo de que a superfície foi formada há 1,5-30 milhões de anos, o que também é coerente com a pequena quantidade de grandes crateras de impacto, já que os terrenos estão em constante renovação por conta da atividade geológica, como estimado por Vid’machenko et al. (2011).

A variação espectral entre os hemisférios de Europa é explicada pela deposição de



Figura C.1: Projeção cartográfica cilíndrica com combinações por cores de imagens das missões *Voyager 2* e *Galileo*. Os hemisférios traseiro (*Trailing*) e anterior (*Leading*) estão expostos à esquerda e à direita do mapa, em ordem. Adaptada de: NASA/JPL/Björn Jónsson.

substâncias com enxofre (S) e magnésio (Mg) originadas nos grandes vulcões de Io, e também por íons da magnetosfera de Júpiter. Ainda mais, a absorção de materiais é mais intensa no hemisfério traseiro, indicando que há um processo no hemisfério dianteiro que transforma os componentes mais rapidamente, possivelmente impactos de pequenos corpos celestes que geram regolito de gelo (Vid'machenko et al., 2011). Tal fenômeno é consistente com o estudo de Ito e Malhotra (2010) de que um satélite em rotação síncrona, como é o caso da Lua e de Europa, o hemisfério dianteiro tende a ter mais crateras de impacto do que o traseiro, por efeitos de geometria.

Assim, o hemisfério dianteiro sofre mais bombardeamento de meteoritos e asteroides e possui brilho mais intenso. Por outro lado, a influência do plasma de elétrons energéticos é mais intenso no hemisfério traseiro e leva à radiólise de algumas substâncias com a produção de gás oxigênio (O_2), por exemplo, e consequente escurecimento da superfície. Também há diferentes colorações, com regiões mais amarronzadas, avermelhadas e amareladas. As Figuras C.2 e C.3 demonstram diferenças na constituição da superfície no terreno caótico de Conamara e em uma região de bandas avermelhadas, pela ordem.

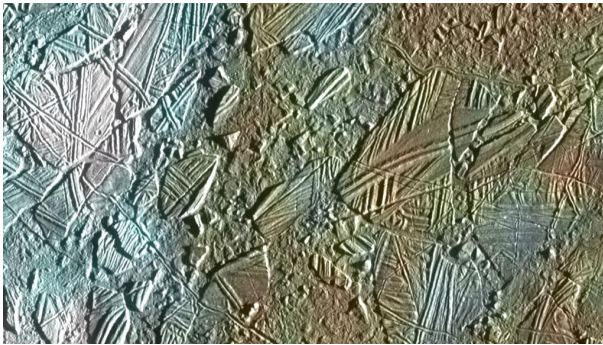


Figura C.2: Região de caos de Conamara, originada a partir de derretimentos e congelamentos sucessivos da crosta de gelo. NASA/JPL/University of Arizona.



Figura C.3: Imagem colorizada de bandas vermelhas na superfície. NASA/JPL-Caltech/SETI Institute.

De modo geral, a superfície de Europa é plana, com algumas irregularidades como crateras de impactos, picos e depressões (*lenticulae*), listras escuras (*lineae*) e bandas. Os processos mais relevantes para a formação da superfície são a atividade tectônica e a existência de terrenos caóticos. Bem como na Terra, constituída de diversas placas rígidas de rocha deslizando no manto, no satélite, a atividade geológica mais intensa ocorre nas bordas de placas de gelo, quando há encontros (convergência), separação (dilatação) ou deslizamento (falhas transcorrentes). O fato do satélite não apresentar relevo de grande altitude, como visto nas montanhas terrestres em zonas de subducção de placas tectônicas, sugere que há pouco material sólido envolvido neste processo (Greenberg, 2008).

C.3 Dinâmica Oceânica

Ashkenazy e Tziperman (2021) sugerem um modelo de circulação geral para o oceano, que inclui todas as componentes da força de Coriolis, salinidade e dinâmica não-hidrostática. Um dos resultados é que há um fluxo de calor de eficiência suficiente para que a crosta de gelo tenha espessura uniforme em todas as latitudes de Europa. Além disso, a água tem temperaturas mais baixas mais próximo ao equador, ainda que a crosta de gelo seja mais quente nesta região, resultado de colunas de Taylor, conforme ilustrado na Figura C.4.

O Teorema de Taylor-Proudman mostra que, em um sistema em rotação estável e de eixo alinhado na direção vertical, o movimento do fluido é constante com a altura, ou

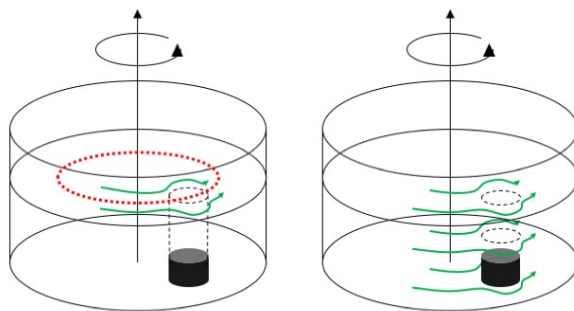


Figura C.4: Escoamento de um fluido (verde) em rotação no sentido anti-horário, exemplificando a formação de uma coluna de Taylor acima do objeto cilíndrico. Produzida por: Dr. Mirjam Glessmer. Acesso em *Adventures in Oceanography and Teaching*.

seja, também em concordância com o vetor de rotação. Desta maneira, quando há um obstáculo, que pode ser pensado como um cilindro, os fluidos o contornam, de modo que há ausência de fluxo na vertical, como se o objeto tivesse uma altura maior. Tal fenômeno pode ser pensado como um cilindro de fluidos acima do obstáculo e que está “preso” a ele, o que é denominado coluna de Taylor (Jacobs, 1964). Colunas de Taylor não são observadas na atmosfera terrestre porque a densidade da mesma não é constante, mas foi sugerido que a teoria pode ser exemplificada com a Grande Mancha Vermelha de Júpiter (Ingersoll, 1969). A Figura C.4 demonstra como ocorre o fluxo (em verde) de um fluido em rotação no sentido anti-horário, ao passar por um obstáculo cilíndrico, mantendo-se constante em relação à altura.

Hesse et al. (2022) propõem que pulsos de derretimento, ou seja, ondas de calor, alargam momentaneamente aberturas na camada de gelo, provavelmente em regiões caóticas. Compostos oxidantes são transportados por tais fissuras antes que sejam congeladas novamente. Simulações indicam que cerca de 85% do O_2 na superfície, produto de radiólise, pode alcançar o oceano em escalas de $2 \cdot 10^4$ anos. Então, é interessante considerar que o oceano de Europa é composto tanto por conteúdos endógenos, como os resultantes de atividade hidrotermal, como por materiais exógenos.

Os fortes resultados da força de maré em Europa podem originar derretimento local da crosta de gelo, formando reservatórios de líquido, possivelmente relacionados à atividade criovulcânica. No fim de uma erupção, o fluido no reservatório pode congelar, ou então a

movimentação dos blocos de gelo pode fechar o mesmo. Lesage et al. (2021) supõem que podem ocorrer diversos episódios em um mesmo reservatório, com sucessivos aberturas e isolamentos.

Apêndice D

Extremófilos

Como complementação da Tabela 4.1, a Figura D.1 (Schröder et al., 2020) demonstra a taxa de crescimento de organismos extremófilos em diferentes parâmetros ambientais.

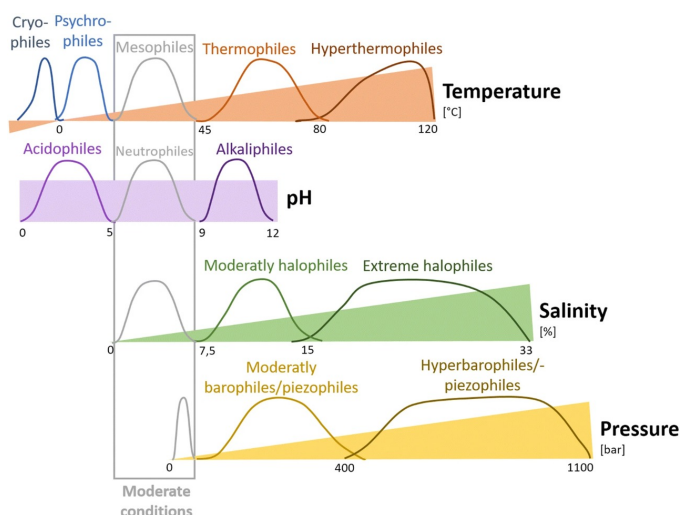


Figura D.1: Condições de crescimento de extremófilos em diversas faixas de temperatura, pH, salinidade e pressão do ambiente. Retirada de Schröder et al. (2020).

Na Figura D.2, ecossistemas terrestres de condições extremas.

Enquanto os extremófilos representam as classes unicelulares, os tardígrados (Figura D.3), também conhecidos como “ursos aquáticos”, são os animais mais extremos no planeta, apenas a título de exemplo. Através de sua capacidade de sobrevivência, podem entrar em estado de latência por muitos anos e vivem em ambientes como o Oceano Ártico e a Antártica. Um tardígrado já sobreviveu a temperaturas abaixo de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Núñez et al., 2019). Estes organismos são foco de muitos experimentos em condições espaciais, como microgravidade e vácuo.

Ainda, a bactéria *Deinococcus radiodurans* (Figura D.4) tolera altos índices de radiação ultravioleta e baixas temperaturas, sendo um extremófilo bastante analisado. Pretendemos

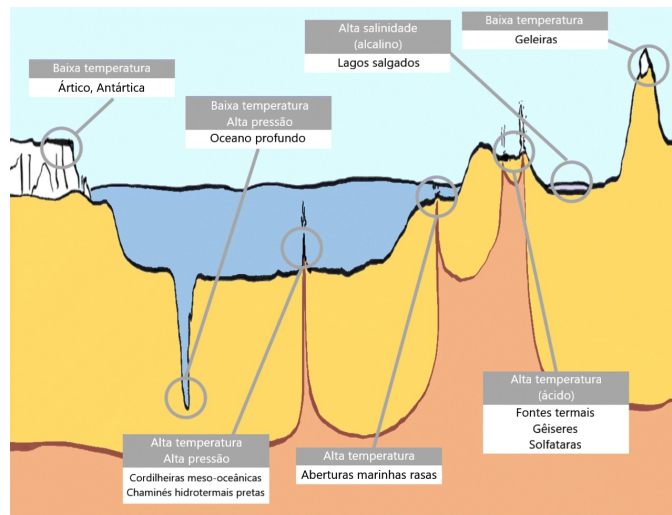


Figura D.2: Representação de ambientes de condições extremas na Terra. Adaptada e traduzida de Schröder et al. (2020).

aprofundar os estudos em extremófilos na continuidade do projeto.



Figura D.3: Fotografia de um tardígrado, animal conhecido por sua habilidade em resistir a condições extremas. Eye of Science/Science Photo Library.



Figura D.4: *Deinococcus radiodurans*, uma espécie de bactéria altamente resistente à radiação UV e a baixas temperaturas, como exemplo de organismo terrestre extremófilo. ESRF.

Figuras

Figuras adicionais complementares aos textos das Seções 1.1, 2 e 3.

E.1 Sondas Espaciais Galileo e Cassini-Huygens



Figura E.1: Ilustração artística da sonda *Galileo*, por JPL/NASA.

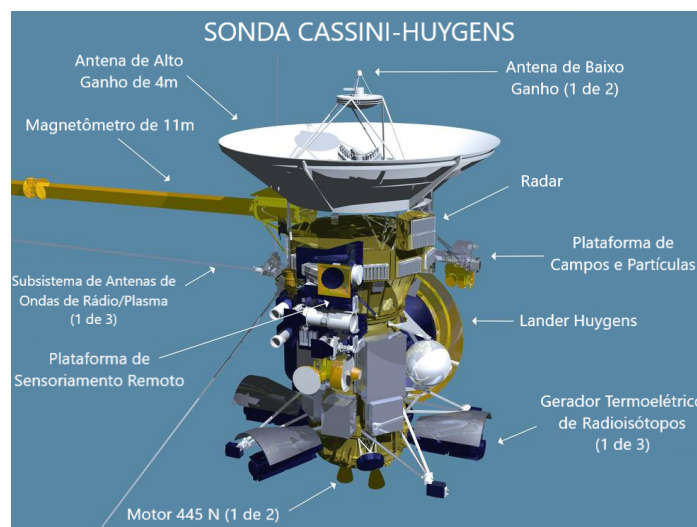


Figura E.2: Representação da sonda *Cassini* com o *lander Huygens* acoplado, e seus instrumentos científicos. Traduzido de NASA Johnson Space Center.

E.2 Imagens Complementares Enceladus



Figura E.3: Distância entre as cidades de São Paulo e Belo Horizonte em comparação ao diâmetro de Enceladus. Adaptado de Google Maps, 2021.



Figura E.4: Enceladus em sua órbita no centro do tênue anel E de Saturno, expelindo material criogênico para a formação do mesmo. NASA/JPL/SSI.

E.3 Imagens Complementares Europa

A fotografia foi obtida pela autora utilizando a câmera fotográfica Sony DSC-HX1 e um tripé simples.

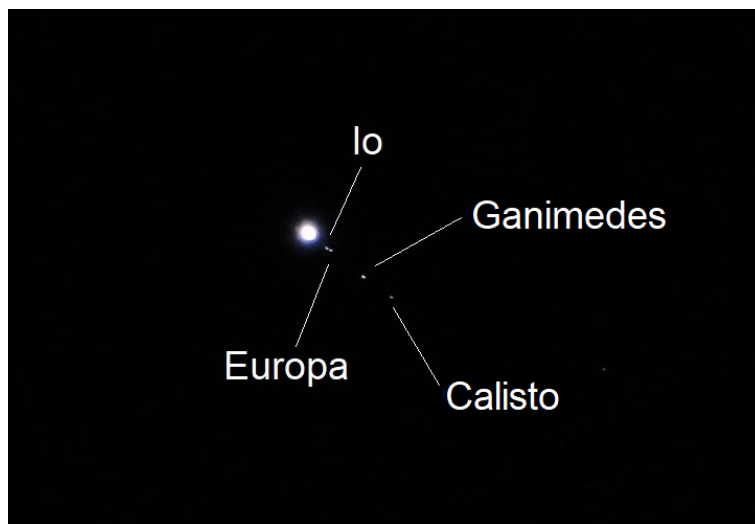


Figura E.5: Indicação das luas galileanas Io, Europa, Ganímedes e Calisto em 06/08/2020. Produzido pela autora.



Figura E.6: Distância entre as cidades de São Paulo (SP) e Oiapoque (AP) em comparação ao diâmetro de Europa. Adaptado de Google Maps, 2022.