

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Hely Cristian Branco

**GEOLOGIA PLANETÁRIA: O PLANETA TERRA COMO MODELO
ANÁLOGO PARA ESTUDO DE CORPOS PLANETÁRIOS**

Orientador: Prof. Fernando Mancini

Curitiba, 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Hely Cristian Branco

GEOLOGIA PLANETÁRIA: O PLANETA TERRA COMO MODELO ANÁLOGO PARA ESTUDO DE CORPOS PLANETÁRIOS

Monografia entregue como requisito parcial para
conclusão da disciplina GC120 - Trabalho de
Conclusão de Curso II.

Orientador: Prof. Fernando Mancini

Curitiba, 2016

*To explore strange new worlds.
To seek out new life and new civilizations.
To boldly go where no man has gone before.*

**James T. Kirk
Captain of the Enterprise**

Star Trek

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal do Paraná por permitir a realização deste e de muitos outros trabalhos ao longo dos últimos seis anos. Agradeço os professores do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná e da *University of Liverpool* por fornecerem as bases teóricas e a inspiração para buscar esse tema. Em especial, agradeço aos professores Richard Holme, Eleonora Vasconcelos e Cristina Vale Pinto Coelho pelos exemplos de excelência acadêmica, que sempre usei como guia em meus estudos.

Agradeço meus colegas de graduação pela convivência e boas memórias ao longo dos anos, e pelo incentivo para desenvolver essa pesquisa, sobretudo aqueles que demonstraram grande curiosidade em todas as etapas de realização do trabalho. Em especial, agradeço as minhas amigas Thaís Marchioro e Ana Cecília, aos meus amigos Bruno Titon, Luan Perreto e Vinícios Antunes e aos demais colegas de mapeamento geológico pela divertidíssima convivência e pelos vários cafés e almoços.

Agradeço meus amigos Eduardo Fabro, Antonio Carlos, Victor Bregola, Caio da Silva, Nicolas Gusso e Lara Lange pelas várias conversas, trocas de ideias e discussões, as quais serviram de inspiração para várias partes deste e de muitos outros projetos nos últimos anos.

Agradeço a minha família por toda a ajuda e incentivo, em especial a meus avós Ignêz Luzia Branco e Lourival Branco, e minha mãe Maria Cristina Branco. Agradeço meu tio José Carlos Branco por todo o incentivo e inspiração acadêmica, fator fundamental na minha busca por um diploma em geociências e na minha insistência em estudar Astronomia.

Por fim, agradeço meu orientador, professor Fernando Mancini, por aceitar orientar uma pesquisa de tema tão inusitado, por todas as ótimas conversas e discussões durante o desenvolvimento da pesquisa, pelas excelentes dicas e sugestões, e por todo o bom humor.

Resumo

Avanços tecnológicos recentes vinculados a exploração espacial permitiram a aquisição de dados anteriormente tidos como inacessíveis. Missões espaciais recentes realizadas pela Agência Espacial Norte-Americana (NASA) e Agência Espacial Européia (ESA), focadas principalmente na Lua, Marte, Júpiter, Saturno e Plutão, forneceram informações que permitiram incontáveis avanços na compreensão dos processos geológicos atuantes nos planetas e luas do Sistema Solar, bem como em corpos planetários em geral (*i.e.* cometas e asteróides). Interpretações dos dados obtidos embasaram-se sobretudo em modelos gerados a partir de processos análogos observados na Terra, extrapolados para os diversos contextos geológicos dos outros astros. Em todos os casos, partiu-se do pressuposto de que os modelos terráqueos podem ser aplicados, desde que sejam feitas as devidas correções para os efeitos das diferenças térmicas, de massa, composição atmosférica, crustal, mantélica etc. Em inúmeros casos, tal correlação mostrou-se possível. Porém, diversas das situações encontradas não podem ser explicadas tomando-se como base unicamente a Terra, exigindo a elaboração de novos modelos e constante adaptação por parte dos cientistas. Além disso, o atual nível de avanço tecnológico impossibilita a comprovação prática de várias das teorias e hipóteses geradas. Logo, interpretações geológicas acerca de outros astros devem ser consideradas apenas como suposições e hipóteses a respeito das escalas dos processos, fornecendo panoramas gerais a despeito dos processos atuantes e nunca quantificações exatas. Modelos gerados são, via de regra, balizados em modelos análogos desenvolvidos para a Terra, e conseqüentemente limitados pelo conhecimento dos processos diretamente observáveis na natureza que nos cerca. Conseqüentemente, feições similares são interpretadas como geradas por processos similares, fato que não necessariamente é verídico em outros ambientes. Nesse contexto, a correta avaliação dos limites interpretativos das informações obtidas faz-se essencial, não só para assegurar a correta aplicação do método científico como para evitar a supervalorização de linhas de raciocínio pouco ou não embasadas, que podem vir a resultar em afirmações infundadas e equívocos científicos diversos. Os estudos de caso analisado demonstraram perfeita compreensão dessas limitações, definindo com clareza as limitações metodológicas e de aplicação das conclusões alcançadas. Missões futuras prometem fornecer quantidades progressivamente maiores de dados, impactando ainda mais a forma como vemos o Universo.

Palavras-chave: Geologia Planetária, Exogeologia, Sistema Solar

Abstract

Recent technological advances in space exploration allowed acquisition of data previously thought as beyond reach. Recent space missions by North America Space Agency (NASA) and the European Space Agency (ESA), focused mainly on the Moon, Mars, Jupiter, Saturn and Pluto, provided information that allowed incommensurable advances in the comprehension of geological processes taking place in other planets and moons of the Solar System, as well as in planetary bodies in general (*i. e.* comets and asteroids). Interpretations of the obtained data was based especially on in analog models generated from analog processes observed on Earth, extrapolated to the many geological contexts of the other celestial bodies. In all cases, the start point was that Earth models can be applied if the necessary corrections are made for differences in temperature, mass, atmospherical, crustal and mantelic composition etc. In many cases, these correlation was demonstrated to be possible. However, a reasonable number of situations can not be explained using Earth as the unique comparison ground making the creating the necessity of new models and constant adaptation by the scientists. Besides this, the current technology level makes impossible practical tests of many of the theories and hypothesis elaborated. Therefore, geological interpretations regarding other celestial bodies must be considered as only general panoramas of the scale of the processes, being only a source for general comprehension of current processes and never as a quantitative evaluation. Generated models are, by rule, conditioned by Earth-based analogs developed for the comprehension of Earth, and , therefore, limited by the current comprehension about the processes currently being observed in nature. Consequently, similar landscapes in other planets are interpreted as generated by similar processes, not necessarily true in other environments. In this context, the correct evaluation of the interpretative boundaries of the information obtained is essential, not only to reassure the correct application of the scientific method, but to avoid over-appraisal of though lines little or not well established that can result in untrue statements and scientific presumptions. The analysed case studies demonstrated perfect comprehension of such limitations, clearly defining the methodological and practical limitations of the conclusions reached. Future missions promise supply progressively higher quantities of data, influencing more the way we perceive the Universe.

Keywords: Planetary Geology, Exogeology, Solar System

Sumário:

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de figuras.....	viii
Lista de quadros e tabelas.....	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Objetivos.....	2
2 Estado da arte.....	2
2.1 As origens da Astronomia: dos Sumérios a Copérnico.....	2
2.2 A Astronomia como ciência: Galileu e o telescópio.....	4
2.3 As Ciências Planetárias como campo da ciência moderna.....	6
2.4 Avanços recentes nas Ciências Planetárias.....	8
2.5 A Geologia Planetária como parte das ciências planetárias.....	9
2.6 O termo “planeta”.....	11
3 Métodos de trabalho.....	11
4 Conceitos fundamentais na Planetologia.....	12
4.1 A lei da gravitação universal de Newton.....	12
4.2 As leis de Kepler.....	13
4.3 Características das órbitas elípticas.....	14
4.4 Alguns fatos sobre o Sistema Solar.....	15
4.5 Sondas e outras fontes de obtenção de dados.....	18
5 Um pouco de filosofia da ciência.....	20
5.1 O paradigma e a ciência revolucionária de Kuhn.....	22
5.2 O racionalismo crítico de Popper.....	23
5.3 Gleiser e a metáfora da ilha do conhecimento.....	24
6 Lua, o satélite natural da Terra.....	26
6.1 Estrutura interna da Lua.....	28
6.2 Peculiaridades da órbita lunar.....	30
6.3 História geológica e origem da Lua.....	31
6.4 EC 1 - Inferência da migração dos pólos lunares a partir de hidrogênio polar.....	32
6.5 EC 2 - Origem da água na Lua primitiva revelada por amostras das highlands lunares.....	35
7 Marte, o planeta vermelho.....	37
7.1 Origem de Marte.....	39
7.2 Propriedades físicas e evolução de Marte.....	40

7.3 Características da superfície marciana	41
7.4 A história geológica de Marte	44
7.5 Água e a possibilidades da vida fora da Terra	45
7.7 EC 3 - Semelhanças entre estruturas sedimentares marcianas e microbialitos terrestres... 46	
7.8 EC 4 - Transporte induzido por fluidos meta-estáveis na superfície de Marte	49
8 O Sistema Plutão-Caronte	52
8.1 Propriedades físicas de Plutão e Caronte	52
8.2 Características das órbitas de Plutão e Caronte	54
8.3 EC 5 - A atmosfera de Plutão conforme observada pela sonda New Horizons	55
8.4 EC 6 - Composição superficial de Plutão e Caronte	59
9 Validade de modelos análogos terrestres no estudo de corpos planetários.....	62
10 Geologia planetária: nova fronteira científica.....	64
11 Conclusões.....	64
Referências bibliográficas	65
Anexo 1 - The Chart of Cosmic Exploration.....	69
Anexo 2 - Geological Map of Mars.....	70

Lista de figuras

Figura 1 - Representação gráfica do sistema ptolomaico de epiciclos e deferente. Fonte: goo.gl/rjkGHP.	3
Figura 2 - Ilustração do modelo heliocêntrico proposto por Copérnico, feita por Andreas Cellarius no livro Harmonia Macrocosmica (1708, domínio público). Fonte: goo.gl/bY8UtF.....	4
Figura 3 - A esquerda, desenhos da Lua feitos por Galileu contidos no livro Siderus Nuncius. A direita, registros das posições relativas de Júpiter e suas luas conforme observadas por Galileu. Fontes: goo.gl/IYC1y e goo.gl/0Xb3el.....	5
Figura 4 - Ilustração da forma geral da órbita Terra de acordo com as Leis de Kepler, que serve como modelo para os demais planetas. Pode-se notar que, em decorrência da lei das áreas, a velocidade orbital dos planetas varia conforme a posição, sendo maior no periélio e menor no afélio (uma vez que as distâncias percorridas são diferentes, embora as áreas varridas sejam iguais). F1 e F2 são os focos da elipse; a distância entre qualquer um desses pontos e o ponto definido pelo cruzamento dos dois eixos (centro da figura) é denominada de distância focal d. Fonte: Faure & Mensing (2007).....	14
Figura 5 - Comparação entre os diâmetros do Sol e dos planetas do Sistema Solar (incluindo Plutão), desenhados em escala. Os valores dos respectivos raios podem ser encontrados na Tabela 4. Fonte: Faure & Mensing (2007).	17
Figura 6 - Diagrama apresentando a distância das órbitas planetárias ao Sol, desenhado em escala. Os planetas seriam pontos com frações de milímetro de diâmetro. Modificação da imagem disponível em: goo.gl/1TcoqU.....	18

- Figura 7 - Exemplos de fontes de obtenção de dados: A) Imagem do European Extremely Large Telescope (E-ELT), um exemplo de telescópio terrestre de grande porte. Fonte: goo.gl/mrLq1B. B) Imagem do telescópio espacial Hubble, o mais famoso telescópio espacial já construído. Fonte: goo.gl/3Ulv6x. C) Imagem da sonda interplanetária Voyager 1. Fonte: goo.gl/5wnqHp D) Imagem da lander Luna 9. Fonte: goo.gl/jkNtyj. E) “Auto-retrato” do rover Curiosity. Fonte: goo.gl/iRrpwv.19
- Figura 8 - Foto do astronauta e piloto do módulo lunar Buzz Aldrin durante as atividades extraveiculares da missão Apollo 11 na Lua, incluindo alguns dos equipamentos usados. Fonte: goo.gl/SQqUuU.21
- Figura 9 - A) Foto da Lua. Notar a diferença da cor entre as highlands, mais claras, e as maria, mais escuras. Fonte: goo.gl/xpEHA4. B) Mosaico de imagens obtidas pelo Lunar Reconnaissance Orbiter da NASA, mostrando a bacia Orientale. Ela tem 930km de diâmetro e três anéis distintos, formando um padrão similar a um alvo. Notar a presença de crateras de tamanhos diversos. Fonte: goo.gl/Zy44gn.26
- Figura 10 - A) Anortosito (amostra 60025) coletado por astronautas da Apollo 16 na Cayley Plains próximo a cratera Descartes, nas highlands lunares. A amostra pesa 1.8kg e é composta de plagioclásio rico em cálcio. Sua cristalização foi há 4.41-4.51 bilhões de anos, quando a Lua ainda era jovem. Fonte: NASA/Johnson Space Center, fotografia S72-42187. B) Basalto vesicular (amostra 15016) coletado por astronautas da Apollo 15 na base das Apennine Mountains no Mare Imbrium. A amostra é cinza escura e pesa 923g. Fonte: NASA/Johnson Space Center, fotografia S71-45477.27
- Figura 11 - A) Perfil de velocidade de propagação de ondas P até profundidade de cerca de 100km, da poção oriental do Oceanus Procellarum (Oceano das Tempestades ou Ocean of Storms). Os aumentos de velocidade observáveis a profundidades de 20 e 60km são atribuídos a transição entre camadas de composições distintas. Fonte: Faure & Mensing (2007, adaptado de Glass 1982). B) Representação da estrutura interna da Lua, ilustrando as diferentes camadas que compõem o interior do satélite. Notar a espessura da litosfera, proporcionalmente muito superior a da Terra, e o reduzido tamanho do núcleo. Fonte: Faure & Mensing (2007, adaptado de Glass 1982).29
- Figura 12 - A) Ilustração do movimento de rotação e revolução da Lua ao redor da Terra conforme descrito no texto. A marca representa a face da Lua apontando para a Terra. Notar a variação da iluminação do satélite ao longo de sua órbita, causa das diferentes fases da Lua. Fonte: Faure & Mensing (2007). B) Esquema representativo da sequência de marés altas e baixas em um determinado ponto (marca) em região costeira. Fonte: Faure & Mensing (2007).30
- Figura 13 - Ilustração esquemática das orientações relativas da Terra e da Lua em relação a eclíptica. Notar a obliquidade do plano orbital lunar em relação a eclíptica e ao equador terrestre. Fonte: Lang (2011).31
- Figura 14 - Diagrama ilustrando a teoria do corpo impactante para formação da Lua, conforme descrita no texto. Fonte: goo.gl/1PasUK.32
- Figura 15 - a-b) Incremento da abundância de hidrogênio nos pólos norte (a) e sul (b) da Lua. c-f) Profundidades nas quais os depósitos são estáveis nos pólos norte (c, e) e sul (d, f), atualmente (c, d) e em uma mistura da distribuição atual e esperada para posições de paleopólos (e, f). Os círculos vermelho e preto mostram os máximos da concentração de hidrogênio nos pólos norte e sul respectivamente. O diamante laranja indica o local de impacto da Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS). Fonte: Siegler et al. (2016).33
- Figura 16 - A) Contornos de concentração de hidrogênio para 75ppm (linhas finas) e 100ppm (linhas grossas) nos pólos norte (em vermelho) e sul (em cinza). Os círculos vermelho e preto

mostram os máximos da concentração de hidrogênio nos pólos norte e sul respectivamente. O diamante laranja mostra o local de impacto da LCROSS. As formas sem preenchimento são projeções no pólo norte. B) Ilustração de dois modos de reorientação planetária: mudança na obliquidade (b) e TPW (c).....34

- Figura 17 - Gráfico comparando os valores finais obtidos pelos autores com dados disponíveis na literatura para composição dos basaltos lunares (com base em amostras coletadas pelas missões Apollo), meteoritos basálticos lunares (Barnes et al. 2013, Greenwood et al. 2011, Tartèse et al. 2013; apud Barnes et al. 2014), e concentrações de OH e de δD de apatitas de rochas das highlands (Greenwood et al. 2011, apud Barnes et al. 2014). A linha pontilhada representa valores aproximados para condritos (Alexander et al. 2012, apud Barnes et al. 2014) e o retângulo cinza claro representa valores de δD estimados para o manto da Terra (Lécuyer et al. 1998; McKeegan & Leshin 2001; apud Barnes et al. 2014). Fonte: Barnes et al. (2014). .36
- Figura 18 - Imagens de Marte obtidas pela NASA, mostrando diversas das feições características do planeta visíveis em órbita, como crateras de impacto e chasma. A variação na cor entre as duas figuras é consequência de diferentes tratamentos computacionais das imagens. Fontes: goo.gl/pl5fla e goo.gl/5SJUbp.38
- Figura 19 - a) Exemplo de estratificação cruzada em rochas sedimentares do alvo Whale Rock obtida pelo rover Curiosity em novembro de 2014. Fonte: goo.gl/e8WU5V.39
- Figura 20 - A) Imagem da cratera Victoria, obtida pela câmera High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) a bordo do NASA's Mars Reconnaissance Orbiter. Fonte: goo.gl/JGE7N6. B) Imagem da Utopia Planitia obtida pelo lander Viking 2. Fonte: goo.gl/XHj5fb. C) Imagem do Valles Marineris, um dos maiores sistemas de cânions conhecidos no Sistema Solar. Fonte: goo.gl/KkDvns.42
- Figura 21 - A) Ilustração das principais feições topográficas do platô Tharsis. Fonte: Faure & Mensing (2007, adaptado de "An Explorer's Guide to Mars" publicado pela Planetary Society) B) Imagem do vulcão Olympus Mons, o maior vulcão do Sistema Solar. Seu cume tem elevação de 21287m e sua base ocupa área de aproximadamente 300000km². A ausência de crateras de impacto no edifício vulcânico indica ocorrência de derrames recente, provavelmente nos últimos 10 mil anos (Faure & Mensing 2007). Fonte: <https://goo.gl/oWTqvz>. C) Dunas ricas em gipso na Olympia Undae. Modificado de: goo.gl/i3Fkjb.43
- Figura 22 - Imagem da calota polar no pólo norte de Marte, obtida pelo Mars Global Surveyor. Notar as feições espiraladas expondo as rochas abaixo do gelo. Fonte: goo.gl/KW6Vw6.44
- Figura 23 - A) Diagrama de estabilidade de fases da água, com as condições superficiais da Terra e de Marte demarcadas. Fonte: Faure & Mensing (2007). B) Foto do meteorito ALH84001,0, coletado no campo de gelo Alan Hills, na Antártica. Os compostos orgânicos encontrados na amostra foram inicialmente interpretados como de origem orgânica. Resultados posteriores corroboraram a origem inorgânica dos compostos. Fonte: goo.gl/7NjlJW.46
- Figura. 24 - Exemplo de interpretação contida no estudo: A) fotomosaico (composto pelas imagens 0306ML0012670000106580E01_DXXX a 0306ML0012670170106597E01_DXXX, e 0306MR001267000020-3930E01_DXXX a 0306MR00126701-70203947E01_DXXX) de afloramento de rochas do MGL; B) croqui das principais estruturas interpretadas pelo autor; e C) sobreposição das duas imagens. Fonte: Noffke (2015).47
- Figura 25 - Exemplo de estudo comparativo de A) de rochas do MGL em Marte (imagem 0306MR0012670140203944E01_DXXX) em comparação a B) exemplos terrestres de MISS no Carbla Point, no oeste da Austrália. Assim como na Fig. 24, são apresentados croquis ressaltando as principais estruturas interpretadas pelo autor (C, D) e sobreposições dos croquis e fotografias originais (E, F). Fonte: Noffke (2015).48

Figura 26 - Resultados obtidos por alguns dos experimentos. As fotos mostram as morfologias de fluxos obtidas a partir do derretimento de blocos de gelo sobre 1-2mm de areia. As condições experimentais são: a) água congelada e b) solução salina congelada a 1 bar e 293K; e c) água congelada e d) solução salina congelada a 9mbar e 293K. Fonte: Massé et al. (2016).....	50
Figura 27 - a) Evolução das dimensões das feições geradas pelo fluxo com o tempo para os experimentos retratados na Fig. 26 (tempo normalizado pela duração total do derretimento do gelo). b) Volume de sedimentos movidos pelos experimentos, para diferentes condições ambientais. Fonte: Massé et al. (2016).	51
Figura 28 - Seção geológica interpretativa detalhando os mecanismos de propagação de água líquida em condições atmosféricas marcianas. As porções azuis correspondem a zona saturada, onde há percolação de água; as zonas amarelas correspondem a porções de areia seca. Fonte: Massé et al. (2016).....	51
Figura 29 - Imagem de Plutão e Caronte, tirada pela sonda espacial New Horizons. Plutão é o maior dos dois astros. Fonte: goo.gl/ZTHI0T.	53
Figura 30 - Mapa com divisão informal dos compartimentos geomorfológicos de Plutão e Caronte. Em vermelho, terrae; em verde, crateras; em amarelo claro, chasmata; em laranja, macula; em azul, montes; em roxo, regios; em amarelo, plana; em ciano, dorsae; em rosa, cavi; em verde claro, lineae; em amarelo dourado, colles; em linhas vermelhas, rupes; em linhas verdes, fossae; e em linhas amarelas, valles. Fonte: Stern et al. (2015).....	55
Figura 31 - Orientações relativas entre os planos orbitais de Plutão e Urano. Fonte: Faure & Mensing (2007).....	56
Figura 32 - Gráficos mostrando a variação nos valores de pressão (a esquerda) e temperatura (a direita) na atmosfera de Plutão. As linhas azuis e vermelhas mostram, respectivamente, dados obtidos na entrada e saída da órbita de Plutão, portanto em lados opostos do astro. Fonte: Gladstone et al. (2016).....	57
Figura 33 - Imagem das camadas de névoa em Plutão, coletada no dia 14 de Julho de 2015 começando as 15:45:43 UTC (observação 5 de P_MULTI_DEP_LONG_1 a MET 299194661-299194671; 0.3s de exposição total), a cerca de 196586km de Plutão e com ângulo de fase de cerca de 169°. Fonte: Gladstone et al. (2016).....	58
Figura 34 - Mapas tipo LEISA dos voláteis (A) CH ₄ , (B) N ₂ e (C) CO. Os painéis superiores ilustram os mapas LEISA, nos quais as cores claras representam maiores linhas de absorção; os inferiores estão sobrepostos a mapa baseado em imagens LORRI. Fonte: Grundy et al. (2016).	60
Figura 35 - Mapa da água não-reativa em Plutão, elaborado a partir das correlações brevemente descritas no texto. Fonte: Grundy et al. (2016).....	61

Lista de quadros e tabelas

Tabela 1 - Principais missões de exploração espacial e suas contribuições.....	7
Tabela 2 - Principais missões de exploração espacial planejadas até 2016	9
Tabela 3 - Propriedades físicas das órbitas dos planetas.....	15
Tabela 4 - Propriedades físicas dos principais astros do Sistema Solar.....	16
Tabela 5 - Propriedades físicas da Lua e da Terra.....	27

Tabela 6 - Escala do tempo geológico lunar	31
Tabela 7 - Principais características das amostras descritas por Barnes et al. (2014).....	35
Tabela 8 - Características orbitais e físicas das luas de Marte.....	38
Tabela 9 - Principais características físicas de Marte e da Terra.....	40
Tabela 10 - Principais propriedades físicas de Plutão e Caronte.....	54

1 Introdução

Modelos sistêmicos de corpos planetários podem ser genericamente divididos em dois grupos. O primeiro trata da origem, diferenciação e evolução desses corpos, sendo baseado em dados de fontes diversas. Por exemplo, estudos observacionais ligados a gênese de elementos e compostos químicos, e conseqüentemente vinculados diretamente a formação e evolução de estrelas e nebulosas, fornecem pistas fundamentais sobre as fases iniciais de formação e evolução desses astros no Sistema Solar. O segundo grupo trata de processos de menor escala, focando-se na evolução interna e superficial dos corpos. Esses modelos, de modo geral, são desenvolvidos usando processos terrestres análogos como base, balizados pelas similaridades das feições observadas e nas diferenças conhecidas entre os corpos considerados.

Em ambos os casos, inovações instrumentais foram fundamentais na sua construção e aperfeiçoamento, permitindo a utilização de fontes de dados atualizadas e mais precisas. Conseqüentemente, conclui-se que o progresso científico e tecnológico, ao menos no âmbito das ciências planetárias, têm forte relação causal, sendo o primeiro muitas vezes decorrente dos avanços no segundo. Pode-se perceber isso, por exemplo, no caso do estudo de Marte, cujo detalhamento é diretamente proporcional a qualidade das informações disponíveis (e.g. resolução das imagens de telescópios). De acordo com Kaula (1968), até pouco depois da metade do século XX apenas dados visuais, obtidos da superfície da Terra, forneciam informações significativas sobre o popularmente conhecido 'planeta vermelho', com resoluções não melhores do que cerca de 0,2 segundos de grau (equivalente a aproximadamente 60km na superfície de Marte nos períodos de maior aproximação à Terra). Tais informações permitiam dividir sua superfície em apenas três unidades com base na cor, sendo elas continentes (porções mais claras), *maria* (termo em latim para o plural de mar, indicando as porções mais escuras) e calotas polares.

Atualmente, as informações coletadas permitem não só classificações mais criteriosas das feições observadas, como a elaboração de modelos de evolução em diversas escalas, tanto para Marte como para vários outros corpos planetários (Faure & Mensing 2007). Tais modelos são via de regra construídos com base na similaridade dos objetos observados à feições terráqueas conhecidas, sendo muitas vezes elaborados com base em modelos computacionais balizados por medições e experimentos realizados na Terra. Eles permitem a melhor compreensão da diversidade de astros existente no Universo e são fundamentais para o refinamento dos modelos de evolução planetária existentes.

1.1 Justificativa

Tendo em vista o acelerado avanço tecnológico balizado pela 'era da informática', perspectivas de estudos de outros corpos planetários tornam-se uma realidade cada vez mais palpável e acessível. Tal fato é ao menos parcialmente evidenciado pelo elevado número de publicações recentes, sobretudo ligadas as descobertas proporcionadas por sondas espaciais (e.g. *Curiosity* & *New Horizon*). Contudo, como em qualquer campo emergente das ciências, a falta de fundamentação histórica dos conceitos utilizados abre espaço para usos incorretos das informações e extrapolações demasiadamente além do plausível aos dados disponíveis. Logo, a correta compreensão das limitações das extrapolações baseadas nos dados existentes faz-se não

só necessária, como fundamental na elaboração de modelos geológicos para explicar as características dos outros corpos planetários do Sistema Solar e do Universo.

1.2 Objetivos

O principal objetivo do trabalho é discutir a validade da utilização de modelos de processos geológicos terrestres como análogos para o estudo e compreensão de corpos planetários. Secundariamente, objetiva-se: a) apresentar e delimitar os termos “ciências planetárias” e “geologia planetária”; e b) discutir a importância da geologia planetária no campo da astronomia e das ciências geológicas.

2 Estado da arte

A história das Ciências Planetárias (ou Planetologia), e por consequência da Geologia Planetária, está diretamente ligada a história da Astronomia. Apenas após séculos de observações, e do advento de instrumentos que permitissem a melhor visualização dos corpos celestes, o homem foi capaz de diferenciar os vários tipos de astros e começar a fazer inferências acerca de suas características e evolução.

2.1 As origens da Astronomia: dos Sumérios a Copérnico

De acordo com Évora (1993), a Astronomia possivelmente surgiu na Babilônia, embora ainda fortemente vinculada a mitologia e ao misticismo. Os primeiros registros consistem em catálogos estelares de cerca de 1200 a.C. associados aos Sumérios. A astronomia desenvolvida por esse povo tinha forte vínculo mitológico, associando astros a divindades, e não se preocupava em explicar o funcionamento do cosmos. Essa astronomia influenciou significativamente a astronomia e mitologia dos povos que mais tarde habitaram a região, destacando-se entre eles os Babilônicos. Os Babilônicos não só incorporaram a ciência dos Sumérios, como criaram uma nova astronomia com base observacional e empírica, e as primeiras bases filosóficas acerca da natureza do Universo (Wikipedia 1). Tais ideias foram então incorporadas pelos Gregos, que continuaram a desenvolver a astronomia e a cosmologia enquanto ciências, agora “desvinculada[s] da mitologia e edificada[s] sobre observações astronômicas [...]” (Évora 1993).

O primeiro sistema astronômico criado pelos gregos possivelmente foi o desenvolvido pela escola de pensamento pitagórica, no século V a.C. (Wikipedia 1). De acordo com esse modelo, todos os astros do cosmos seriam esferas perfeitas orbitando o Altar de Zeus, principal divindade da mitologia grega. Embora fortemente baseado em um senso estético que considerava a esfera como mais perfeita das formas, estabeleceu vários conceitos-chave para modelos posteriores (e.g. o conceito de órbitas) e as bases filosóficas que levaram a criação do modelo heliocêntrico. Esse modelo foi sucedido pelo de Platão, desenvolvido no século IV a.C. (Évora 1993), que pela primeira vez preocupava-se em explicar o movimento dos planetas. Segundo ele, os planetas estariam posicionados em esferas celestes próprias, que moviam-se ao redor da Terra. Aristóteles usou essas ideias como base para desenvolver um modelo próprio, também centrado na Terra. Segundo o filósofo, todos os astros do cosmos, com exceção da Terra, seriam compostos por éter, dispostos em duas esferas celestes. A primeira seria composta por várias esferas planetárias móveis interconectadas, onde ficariam os planetas (incluindo o Sol e a Lua); a segunda conteria

todas as estrelas fixas, imóveis umas em relação as outras. O modelo aristotélico, por sua vez, foi usado por Ptolomeu como base para o desenvolvimento do Sistema de Epiciclos e Deferente, que buscava explicar fenômenos até então inexplicados (e.g. variações no brilho das estrelas). Segundo esse modelo, as órbitas de todos os astros podiam ser explicadas por epiciclos (órbitas circulares contendo órbitas circulares) centrados na Terra (Évora 1993), resultando nos padrões de movimento observados (Figura 1).

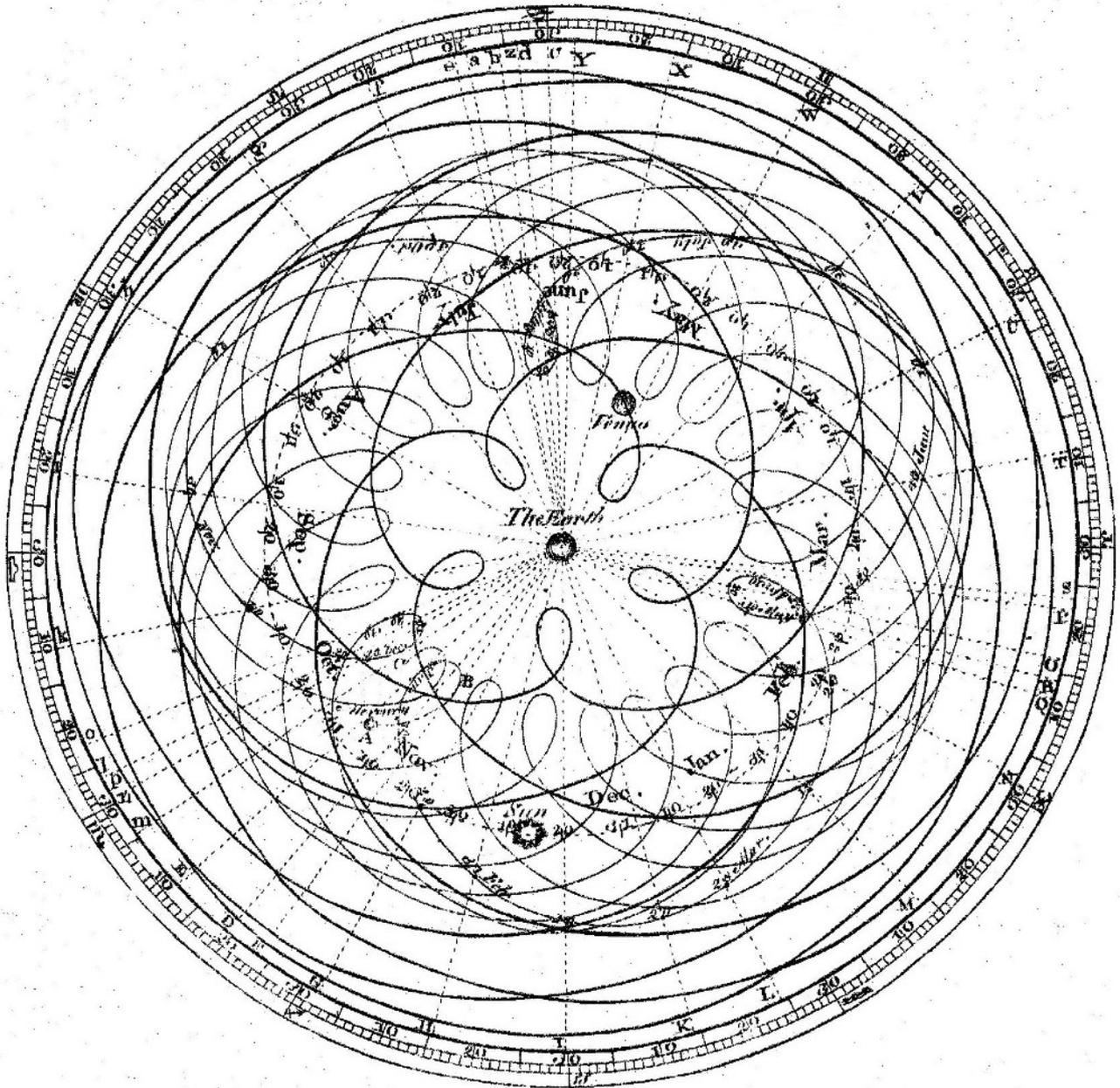


Figura 1 - Representação gráfica do sistema ptolomaico de epiciclos e deferente. Fonte: goo.gl/rjkGHP.

O Sistema de Epiciclos e Deferente perdurou até meados do século XVII, tendo passado apenas por pequenas modificações e complementações, quando Copérnico propôs seu modelo heliocêntrico (Figura 2). Em parte motivado por ideais neoplatônicos de beleza, prezando a simplicidade matemática e harmonia das explicações científicas, Copérnico propôs um modelo centrado no Sol. As esferas celestes ocupadas pelos planetas foram ordenadas em relação a proximidade ao Sol, na familiar sequência Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno, terminando na esfera das estrelas fixas. Copérnico também atribuiu três tipos de movimento à

Terra: rotação ao redor de um eixo, translação ao redor do Sol e variação na inclinação do eixo de rotação. Esse modelo não só rompeu com os paradigmas geocêntricos dominantes nos mais de mil anos anteriores, como foi o primeiro a abandonar definitivamente a distinção entre mecânica celeste e terrestre introduzida por Aristóteles (Évora 1993). Todavia, representou “uma reformulação limitada na teoria planetária dentro das linhas gerais da estrutura aceita na ciência aristotélica” (Westfall, *apud* Évora 1993), tendo iniciado uma revolução científica que seria completada pela próxima geração de astrônomos.

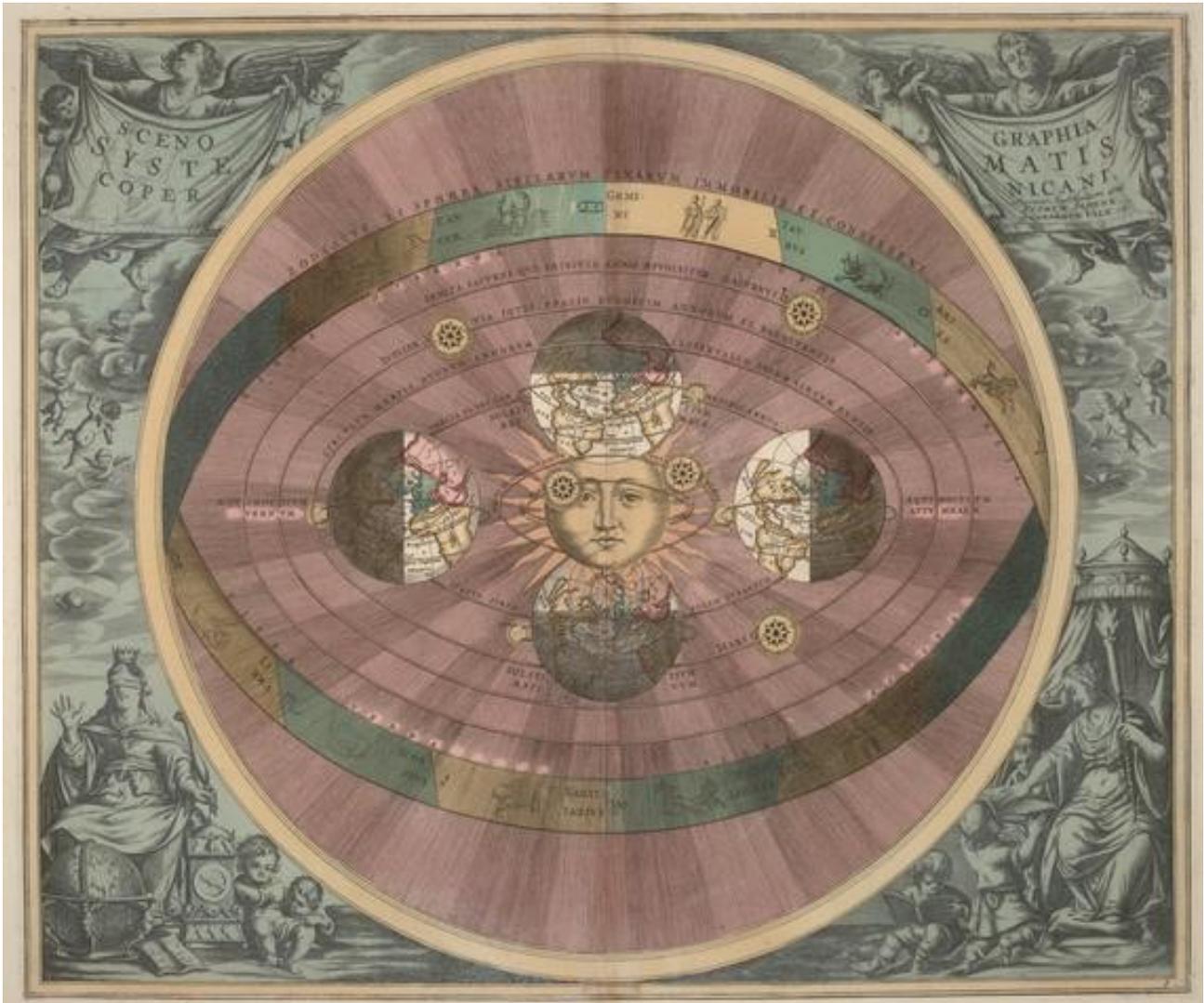


Figura 2 - Ilustração do modelo heliocêntrico proposto por Copérnico, feita por Andreas Cellarius no livro *Harmonia Macrocosmica* (1708, domínio público). Fonte: goo.gl/bY8UtF.

2.2 A Astronomia como ciência: Galileu e o telescópio

O copernicanismo foi alvo de diversas críticas no fim do século XVI, destacando-se os questionamentos de Tycho Brahe. Brahe opunha-se ao tamanho gigantesco do Universo em relação a Terra implícito no modelo de Copérnico (Évora 1994); considerava inadmissível a grande diferença de escalas e sua principal consequência direta: que “todas elas [as estrelas] que pareciam alguma coisa brilhantes deviam ser maiores do que a trajetória ou a órbita da Terra [...]” (Hyugens 1698¹, *apud* Évora 1994). Ele propôs um sistema astronômico próprio,

¹Hyugens, C. *Cosmotheorus, Sive Terris Coelestibus, Earumque, Ornatu, Conjecture; 1698* (français et latin) Liver 1, pg. 808-809. In: *Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens*. La Haye: Martinus Nijhoff, 1994, v. 21.

intermediário aos propostos por Ptolomeu e Copérnico, ilustrando como a história do pensamento científico “não é inteiramente lógica” (Koiré 1973, *apud* Évora 1994). Concomitantemente, outros pensadores, incluindo Galileu, continuavam a usar ideias ptolomaicas em seus trabalhos, mantendo a Terra como centro do Universo e ignorando as novas possibilidades trazidas pelo modelo heliocêntrico.

Somente no início do século XVII, com o advento do telescópio como aparato científico, que mudanças significativas nesse imaginário aconteceram. A data precisa de surgimento desse instrumento é incerta. Segundo Évora (1994), o primeiro telescópio propriamente dito foi criado por Galileu em 1610, baseado em um instrumento óptico mais rudimentar criado na Holanda em 1608 com a finalidade de entreter a corte. Galileu, através do método de tentativa e erro², aperfeiçoou os princípios usados no instrumento holandês, criando diversos instrumentos antes de chegar na versão ‘final’ que apresentou aos intelectuais italianos em 1610, continuando a criar dispositivos com capacidades de aumento progressivamente maiores nos anos subsequentes.

As primeiras observações da Lua foram feitas por Galileu em 1609, utilizando um instrumento com capacidade de aumento de cerca de 20 vezes. Foram registradas através de uma série de desenhos das diversas fases do astro (Figura 3), pela primeira vez revelando seu caráter montanhoso. Em 1610, o cientista fez suas primeiras observações de um planeta, Júpiter. Também registradas sob a forma de desenhos (Figura 3), tais observações permitiram concluir a existência de luas ou de “planetas orbitando o planeta” (Évora 1994).

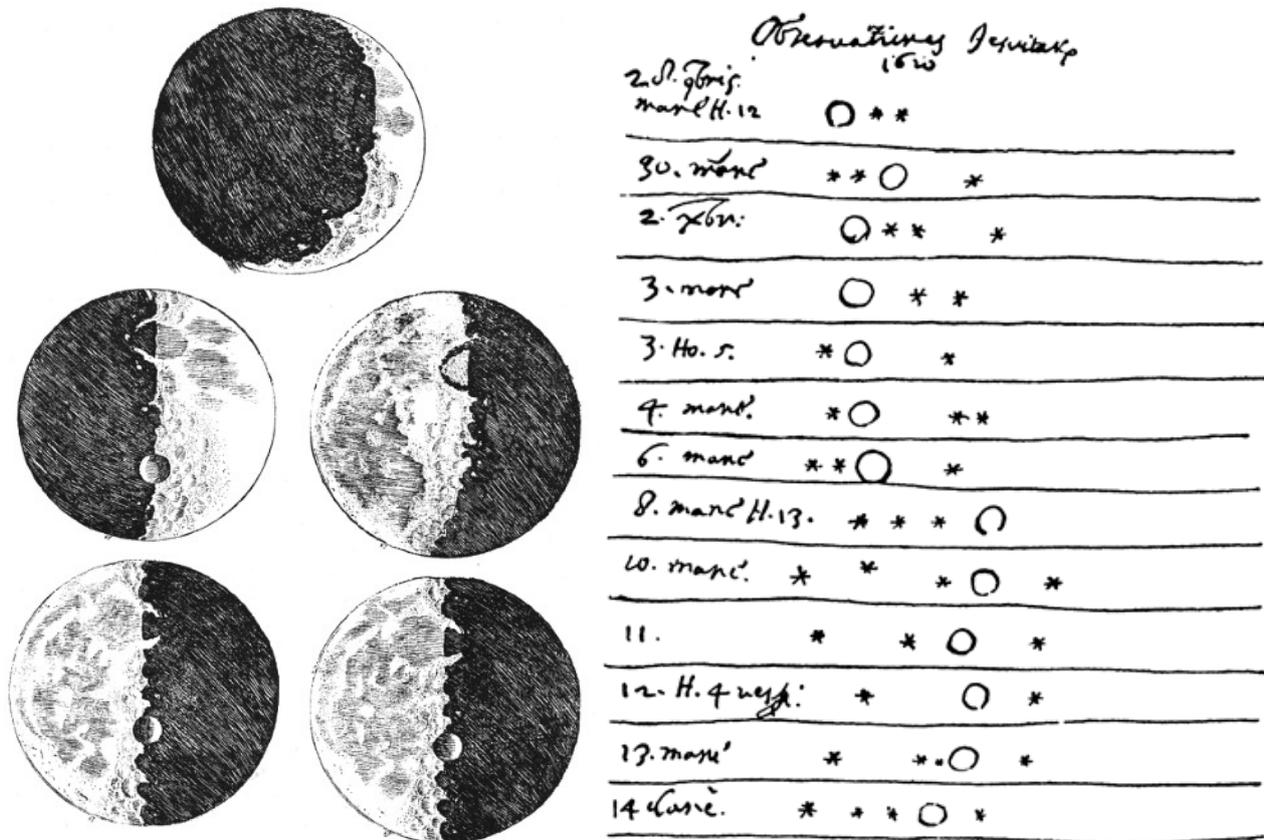


Figura 3 - A esquerda, desenhos da Lua feitos por Galileu contidos no livro *Siderus Nuncius*. A direita, registros das posições relativas de Júpiter e suas luas conforme observadas por Galileu. Fontes: goo.gl/I1YC1y e goo.gl/0Xb3el.

²Para mais detalhes sobre a história do telescópio, ver Évora (1994).

As novas informações levaram Galileu a resgatar e defender o modelo heliocêntrico de Copérnico, uma vez que contra-atacavam críticas fortes dirigidas a ele. Mesmo assim, foram fortemente contestadas, sobretudo no que dizia respeito aos instrumentos usados para observação. A falta de compreensão dos princípios básicos de ótica e da própria organização do Universo levou a críticas ferrenhas às observações feitas ao telescópio, uma vez que fenômenos contrários ao senso comum eram corriqueiros (Évora 1994). Merece destaque o comportamento aparentemente antagônico dos planetas e estrelas quando vistos ao telescópio; os primeiros pareciam aumentar enquanto as segundas pareciam diminuir, ou em outras palavras, “[...] os primeiros eram trazidos mais para perto, enquanto as últimas se viam afastadas” (Feyrabend 1970, *apud* Évora 1994). Como resposta, Galileu refinou suas observações nos anos subsequentes e desenvolveu uma nova teoria física. Embora por vezes pouco fundamentada em algo senão lógica, portanto se aproximando mais de um raciocínio filosófico do que físico, estabeleceu várias das bases do pensamento científico mais tarde usadas por Kepler e Newton no desenvolvimento de suas respectivas teorias (e.g. uso da matemática para quantificar movimentos, princípio da inércia etc.).

2.3 As Ciências Planetárias como campo da ciência moderna

A breve análise historiográfica feita nas seções 2.1 *As origens da Astronomia: dos Sumérios a Copérnico* e 2.2 *A Astronomia como ciência: Galileu e o telescópio* torna clara a dependência das Ciências Planetárias da qualidade dos instrumentos observacionais e de medição disponíveis. As descobertas de Galileu, por exemplo, só foram possíveis graças ao advento do telescópio, permitindo que o cientista realizasse observações que levaram a profundas mudanças nas concepções acerca de diversos astros do Sistema Solar e, por consequência, do Universo. Mesmo assim, poucas foram as inovações posteriores, ao menos no que diz respeito as características dos corpos planetários que não a Terra; apenas no final da era contemporânea ocorreram mudanças consideráveis nas concepções acerca da natureza e características dessa classe de astros.

Nos séculos posteriores às descobertas de Galileu, diversas melhorias nos telescópios foram feitas, resultando na criação de instrumentos com maiores capacidades de ampliação e precisões progressivamente melhores. Porém, até meados do século XX, observações de detalhe de corpos mais distantes do que Marte não eram possíveis, devido sobretudo as barreiras instrumentais impostas pelos equipamentos usados. Imagens da superfície de Marte, por exemplo, eram limitadas a resoluções de 0,2 segundos de grau, ou aproximadamente 60km, e fortemente dependentes da proximidade do astro (Kaula 1968). Tamanha era a limitação, que diversos dos planetas do Sistema Solar, como Netuno e Plutão, não passavam de pontos luminosos mesmo nos melhores instrumentos, enquanto diversos outros, como os asteróides e algumas luas, não haviam sido observados ou sequer eram conhecidos (Wikipedia 2, 3, 7).

Mudanças nesse panorama começaram em 1957, com o lançamento das primeiras sondas espaciais e o início da exploração do espaço propriamente dita (Grayzeck 2012, 2016a). As primeiras sondas (e.g. Sputnik 1 e 2) pouco fizeram em termos de coleta de dados, focando-se apenas no sucesso do lançamento e operação uma vez em órbita. Foi apenas em 1959 que a

missão Luna 3, lançada pela extinta União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), enviou fotos do lado oculto da Lua³, configurando os primeiros dados obtidos por uma sonda espacial fora da Terra (Grayzeck 2016b). Diversas missões a sucederam, com enfoques em diversos planetas ou conjuntos de planetas (Tabela 1), processo esse que continua até hoje (ver seção 2.4 *Avanços recentes nas Ciências Planetárias*).

Tabela 1 - Principais missões de exploração espacial e suas contribuições⁴

missão	descobertas/contribuições	data de lançamento
<i>Luna 1</i>	primeiro <i>flyby</i> da Lua	02/01/1959
<i>Luna 2</i>	primeira espaçonave a atingir a superfície da Lua	12/09/1959
<i>Luna 3</i>	primeiras imagens do lado oculto da Lua	04/10/1959
<i>Mariner 2</i>	primeiro encontro planetário de sucesso e primeiro <i>flyby</i> de Vênus	27/08/1962
<i>Mariner 4</i>	primeiro <i>flyby</i> de Marte	28/11/1964
<i>Venera 3</i>	primeira espaçonave a atingir a superfície de outro planeta e primeiro pouso em Vênus	16/11/1965
<i>Luna 9</i>	primeiro <i>lander</i> lunar	31/01/1966
<i>Luna 10</i>	primeiro <i>orbiter</i> lunar	31/03/1966
<i>Apollo 11</i>	primeira missão tripulada a outro astro (Lua) e primeira missão de coleta de amostras (com sucesso)	16/07/1969
<i>Venera 7</i>	primeiro <i>lander</i> de Vênus	17/08/1970
<i>Pioner 10</i>	primeiro <i>flyby</i> de Júpiter	03/03/1972
<i>Pioner 11</i>	primeiro <i>flyby</i> de Saturno	05/04/1973
<i>Mariner 10</i>	primeiro <i>flyby</i> de Mercúrio	04/11/1973
<i>Venera 9</i>	primeiro <i>orbiter</i> e primeiras imagens da superfície de Vênus	08/06/1975
<i>Viking 1</i>	primeiros dados de <i>lander</i> recebidos e primeiras imagens da superfície de Marte	20/08/1975
<i>Voyager 2</i>	primeiro <i>flyby</i> de Urano e Netuno	20/08/1977
<i>Hubble Space Telescope</i>	lançamento de um dos telescópios mais versáteis da história da astronomia	24/04/1990
<i>Mars Pathfinder</i>	primeiro <i>rover</i> planetário (Marte)	04/12/1996
<i>Cassini-Huygens</i>	primeiro <i>orbiter</i> de Saturno e primeiro <i>lander</i> em planetas do Sistema Solar Exterior	15/10/1997
<i>Rosetta/Philae</i>	primeiro <i>orbiter</i> e <i>lander</i> de cometa	02/03/2004
<i>New Horizons</i>	primeiro <i>flyby</i> no sistema Plutão-Charonte	19/01/2006
<i>Mars Science Laboratory</i>	lançamento de uma das principais sondas em Marte (<i>Curiosity</i>)	26/11/2011

fontes: Grayzeck (2012, 2016a) e Wikipedia (8, 9).

O avanço tecnológico contínuo, sobretudo ligado as tecnologias computacionais, permitiu a construção de sondas cada vez melhores, culminando no aumento progressivo da qualidade,

³Ver definição de rotação sincronizada na seção 4 *Conceitos fundamentais na Planetologia*.

⁴Para definições dos termos desconhecidos, ver seção 4 *Conceitos fundamentais na Planetologia*.

quantidade e variedade de dados obtidos nessas missões. Tais mudanças ampliaram as fronteiras das ciências planetárias de maneira inédita, transformando barreiras técnicas até então existentes em obstáculos facilmente superáveis (e.g. imageamento de afloramentos rochosos em escala centimétrica em Marte). Atualmente vivemos uma fase de constantes descobertas, fato facilmente constatado ao se observar o número de publicações ligadas a Planetologia nos principais periódicos mundo afora (ver seção 2.4 *Avanços recentes nas Ciências Planetárias*). Algumas dessas descobertas mostraram-se essenciais para o avanço metodológico desse campo da ciência, resultando no estabelecimento de definições-base há muito negligenciadas. O mais claro exemplo é a criação de uma definição formal para o termo 'planeta', feita apenas em 2006 pela União Internacional de Astronomia (*International Astronomical Union - IAU*). Até então, esse e outros termos, como asteróide ou planeta-anão, não existiam, tornando qualquer classificação proposta arbitrária, o que evidencia a grande interdependência da Planetologia em relação as diversas outras áreas da ciências moderna.

2.4 Avanços recentes nas Ciências Planetárias

Os avanços recentes no campo da Planetologia podem ser divididos em dois grandes grupos com base no método de obtenção das informações. O primeiro consiste nas descobertas feitas com base em observações de telescópios em terra ou espaciais; o segundo, em avanços vinculados a dados coletados por sondas espaciais.

As observações de telescópio levaram a descoberta de inúmeros corpos não observáveis diretamente, seja devido a enorme distância que os separa da Terra (caso dos exoplanetas) ou ao seu tamanho extremamente pequeno em escala astronômica (caso dos asteróides e demais corpos menores do Sistema Solar), ampliando a compreensão do Cosmo de modo geral. Um exemplo é a descoberta de Proxima Centauri b, um exoplaneta⁵ de massa próxima a da Terra e situado na zona habitável da estrela Proxima Centauri. Tal fato não apenas mudou a compreensão acerca do Sistema Estrelar de Proxima Centauri, até então tido como sem planetas, como trás perspectivas novas para a exploração de planetas fora do Sistema Solar. Pela primeira vez, enviar sondas a um exoplaneta tornou-se tangível, uma vez que Proxima Centauri é a estrela mais próxima do Sol, a apenas 4,2 anos-luz⁶ de distância (Wenz 2016, *Cosmos: uma odisséia do espaço-tempo* 2014).

Os dados coletados por sondas espaciais, por sua vez, levaram a mudanças mais profundas na concepção acerca de alguns astros, dentre eles a Lua, Marte, Júpiter, Plutão e cometas de modo geral. As sondas mais recentes, sobretudo as lançadas nos anos 2000, permitiram obter dados de origem primária dos corpos referidos, como medidas de campo magnético, medidas de campo elétrico, análises espectrométricas e fotografias de alta resolução. Alguns exemplos são as primeiras imagens de Plutão e Caronte, observados pela primeira vez em 2015 (ver seção 8.1 *Características gerais do sistema Plutão-Caronte*), as diversas imagens enviadas pela sonda *Curiosity* das várias paisagens e afloramentos rochosos de Marte (ver seção 7.1 *Características gerais de Marte*), e as primeiras medições feitas no núcleo de um cometa

⁵Ver classificação de corpos planetários na seção 4 *Conceitos fundamentais na Planetologia*.

⁶Ver definições de distâncias astronômicas na seção 4 *Conceitos fundamentais na Planetologia*.

feitas pelo *lander Rosetta* (ESA 2014). Esses dados levaram a revoluções na compreensão desses corpos, ampliando os horizontes da Planetologia e da Ciência como um todo. Exemplos de descobertas são a comprovação da existência de água em Marte, que não apenas confirmou diversas hipóteses acerca da evolução do planeta como alimentou teorias a respeito da origem e evolução da vida como a conhecemos (Massé *et al.* 2016), e a descoberta de afloramentos de camadas sedimentares no planeta, que confirmou hipóteses acerca da evolução geológica do planeta (Dyches 2016).

Muitas das missões citadas acima continuam em atividade, gerando volumes crescentes de informações e permitindo a criação de modelos progressivamente mais precisos. Além disso, novas missões estão planejadas para serem executadas nos próximos anos (Tabela 2), o que aumentará o volume de dados disponível à comunidade científica e, conseqüentemente, permitirá mais inovações nesse campo da ciência.

Tabela 2 - Principais missões de exploração espacial planejadas até 2016

missão	objetivos	início previsto
<i>Astrobotic Technology</i>	primeira missão privada de lançamento de <i>lander</i> e <i>rover</i> lunares	2017
<i>InSight</i>	<i>lander</i> em Marte	2018
<i>SpaceX Red Dragon</i>	primeira missão privada de lançamento de <i>lander</i> para Marte	2018
<i>Chang'e 4</i>	primeiro pouso no lado oculto da Lua	2020
<i>Chang'e 6</i>	coleta de amostras da Lua	2020
<i>Mars sample return mission (MSRM)</i>	coleta de amostras de Marte	2020
<i>Jupiter Icy Moon Explorer</i>	estudo das luas galileanas de Júpiter	2022
<i>Europa Mission</i>	exploração da lua Europa	2025
<i>Mercury-P</i>	primeiro <i>lander</i> em Mercúrio	2031
<i>Orion</i>	primeira missão tripulada para Marte	2037

fontes: Grayzeck (2012, 2016a) e Wikipedia (8, 9).

2.5 A Geologia Planetária como parte das ciências planetárias

A criação da Geologia Planetária, ou Astrogeologia, como ramo independente das ciências astronômicas pode ser atribuída ao geólogo americano Dr. Eugene Merle Shoemaker, que pela primeira vez trouxe princípios geológicos para o estudo e mapeamento de corpos planetários no início dos anos 1960. Enquanto estudava a exploração de depósitos de urânio nos estados de Colorado e Utah em 1948, Shoemaker aproximou-se dos edifícios vulcânicos e cratera de impacto no Platô do Colorado (*Colorado Plateau*). Esse contato levou-o a seus primeiros estudos acerca de crateras de impacto, trabalho que continuou por toda sua vida. Dentre seus feitos, criou o Programa de Pesquisa em Astrogeologia no Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey - USGS*) e fez importantes contribuições para o estudo de crateras de impacto (e.g. Chao *et al.* 1960), mapeamento da Lua (e.g. Shoemaker *et al.* 1970) e estudo de cometas e asteróides (Wikipedia 6, USGS).

Desde seu surgimento, a Geologia Planetária passou a integrar o quadro de pesquisas de diversas instituições, como a Universidade do Arizona, a Universidade do Colorado, o Instituto Tecnológico de Massachussets (*Massachussets Institute of Technology - MIT*), a Universidade de Cambridge e a Universidade de Oxford, dentre outras. Além disso, evoluiu como área altamente interdisciplinar, uma vez que:

In order to successfully interpret the various types of remote sensing and other data that are available, the planetary geologist must have a good background not only in geology, but also, depending on the specific application, in such diverse subjects as astronomy, mineralogy, geochemistry, geophysics, chemistry or even biology (Bell *et al.* 1999, pg. 509).⁷

Ainda segundo Bell *et al.* (1999, pg. 509), a área:

[...] includes a substantial element of exploration and discovery. Many times students and researchers in the field will be exposed to completely new terrains or processes that have no clear terrestrial analogs. [...] In these situations the multidisciplinary nature of the field provides its greatest advantage, because the skilled planetary geologist must be able to apply universal sets of physical laws effectively to new or unusual situations.⁸

Tal visão é compartilhada por Faure & Mensing (2007, pg. xvii), que afirmam que:

[...] planetary science tends to unify subjects in the Earth Sciences that are customarily taught separately: geophysics, volcanology, igneous petrology, mineralogy, geomorphology, geochemistry, hydrogeology, glaciology, tectonics, economic geology, historical geology, as well as meteoritics, microbiology, physics, astronomy, atmospheric science, and even geopolitics and international relations. [...] The exploration of space is by necessity a cooperative enterprise in which national borders, cultural differences, and even language barriers fade.⁹

Nesse contexto, a atuação de pesquisadores das Ciências da Terra é essencial, uma vez que esses cientistas “estão acostumados a construir hipóteses realistas a partir de grandes conjuntos de dados numéricos e informações visuais” (traduzido de Faure & Mensing 2007, pg. xvii). Sob esse enfoque, Greeley & Bender (1998), atribuem o surgimento de uma visão unificada quanto aos processos responsáveis pela origem e evolução dos planetas à exploração espacial. Segundo os autores, outros planetas podem preservar em suas superfícies evidências de fases evolutivas há muito tempo apagadas na Terra, o que permite, através da correlação interpretativa, criar um panorama geral da evolução dessa classe de astros baseado nas respectivas evoluções geológicas. Ainda atestam que outros planetas, em determinadas circunstâncias, podem ser considerados como experimentos científicos gigantescos conduzidos sob condições diferentes

⁷Para corretamente interpretar os vários tipos de dados de sensoriamento remoto e outros dados disponíveis, o geólogo planetário precisa ter bom embasamento não apenas em geologia, mas também, a depender da aplicação específica, em diversas áreas como astronomia, mineralogia, geoquímica, geofísica, química e até mesmo biologia

⁸[...] inclui um elemento substancial de exploração e descoberta. Muitas vezes estudantes e pesquisadores nessa área serão expostos a terrenos ou processos completamente novos e que não tem análogos terrestres claros. [...] Nessas situações sua natureza multidisciplinar proporciona as maiores vantagens, uma vez que geólogos planetários experientes precisam estar aptos a aplicar conjuntos universais de leis físicas em situações novas ou incomuns.

⁹[...] ciências planetárias tendem a unificar áreas nas Ciências da Terra que são costumeiramente ensinadas separadamente: geofísica, vulcanologia, petrologia ígnea, mineralogia, geomorfologia, geoquímica, hidrogeologia, glaciologia, tectônica, geologia econômica, geologia histórica, bem como meteorítica, microbiologia, física, astronomia, ciências atmosféricas e até mesmo geopolítica e relações internacionais. [...] A exploração do espaço é por necessidade uma ação cooperativa na qual fronteiras nacionais, diferenças culturais e até mesmo barreiras linguísticas desaparecem.

das presentes na Terra, os quais nunca poderiam ser conduzidos por pesquisadores da área de Ciências da Terra no nosso planeta.

2.6 O termo “planeta”

Segundo o *Online Etymology Dictionary*, o termo planeta, no inglês *planet*, foi originado a partir do grego *planetai*, que significa “estrelas errantes (*wandering stars*)”. Originalmente era usado como forma de diferenciar os cinco astros que aparentavam mover-se no céu noturno (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) das demais estrelas, em alguns casos englobando também o Sol e a Lua. Apenas com a invenção do telescópio, durante a renascença, o termo passou a ter uma conotação não apenas dinâmica (centrada no movimento), estendendo-se para corpos iluminados (não emitem luz própria) que orbitavam o Sol (*Space.com* 2008, 2014).

De acordo com a Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (*National Aeronautics and Space Administration - NASA* 2009), apenas em 2006 o termo ganhou uma definição científica formal. Segundo a União Astronômica Internacional (*International Astronomical Union - IAU* 2006), para um corpo ser considerado um planeta ele precisa atender a três critérios essenciais: orbitar o Sol, ser grande o suficiente para que sua gravidade o reduza aproximadamente a uma esfera e ter limpado os arredores de sua órbita de outros objetos menores. Todavia, a definição é considerada controversa, uma vez que os critérios selecionados são vagos (e.g. não foi definido o quão esférico um corpo precisa ser ou quão vazia a área nos arredores da órbita precisa ser) e automaticamente excluem astros fora do Sistema Solar (*Space.com* 2008, 2014).

3 Métodos de trabalho

Este trabalho foi dividido em quatro etapas principais. Em um primeiro momento foi realizada revisão bibliográfica geral, objetivando-se conceituar “Geologia Planetária” e elaborar o estado da arte dessa área das ciências planetárias. Para isso, foi realizado levantamento bibliográfico sobre as principais missões espaciais e descobertas a respeito dos principais corpos planetários do Sistema Solar. As informações obtidas foram sintetizadas em resumos e tabelas, vinculando graficamente as missões às descobertas por elas proporcionadas. Esses materiais foram então utilizados, em conjunto às referências bibliográficas disponíveis, para a seleção de três corpos planetários (Lua, Marte e Sistema Plutão-Caronte) que serviram como base para as discussões propostas.

Foi feita revisão bibliográfica acerca dos exemplos selecionados, objetivando-se compreender o atual estado de conhecimento dos corpos planetários referidos. Foi elaborada síntese das informações coletadas, objetivando-se montar um quadro geral do conhecimento sobre cada exemplo. Para cada um deles, foram selecionados dois artigos, ou estudos de caso (EC), que representam inovações em relação aos conceitos já estabelecidos (e.g. a descoberta de gelo na Lua, até então tida como completamente anidra). Em seguida, a metodologia empregada em tais artigos foi analisada, objetivando-se qualificar a plausibilidade das hipóteses geradas e traçar linhas de raciocínio que permitissem a compreensão (ao menos semi-quantitativa) do significado das proposições alcançadas. Como resultado dessas duas etapas, foram gerados

resumos, tabelas e gráficos, que por sua vez foram utilizados na comparação dos modelos uns com os outros.

Por fim, os EC foram fonte para discutir a validade do uso de modelos análogos terrestres no estudo de corpos planetários e dos limites da aplicação desses conceitos. Nessa etapa do projeto foi dada ênfase a uma discussão filosófica acerca dos limites da aplicação de modelos baseados na Terra e, portanto, diretamente observáveis, a outros astros, que encontram-se ao menos por hora inacessíveis à observações e medições diretas em grau satisfatório.

4 Conceitos fundamentais na Planetologia

A Planetologia, por se enquadrar como campo das geociências inserido nas ciências astronômicas, requer do pesquisador o domínio de uma série de conceitos, no geral de cunho físico, químico ou mais raramente biológico, muitas vezes não abordados nos cursos de geociências tradicionais. Alguns desses conceitos, considerados fundamentais, serão brevemente abordados a seguir. Foram selecionados com base em Geissler (2016), Faure & Mensing (2007), Chapman (2007), Head (2007), Snook *et al.* (2007), Greeley, R. & Bender, K. (1998) e Kaula (1968), bem como nas dificuldades encontradas durante a elaboração do presente texto e em discussões vinculadas aos temas abordados.

4.1 A lei da gravitação universal de Newton

A força gravitacional exercida entre dois corpos pode ser descrita pela lei da gravitação universal de Newton, expressa matematicamente da seguinte forma:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1)$$

onde F é a força gravitacional em Newtons (N), M é a massa de um dos objetos em quilogramas (kg), m a massa do outro objeto em quilogramas, r é a distância entre os centros de massa dos dois corpos, e G é a constante gravitacional ($6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$).

Algumas implicações da equação acima são fundamentais para o correto entendimento da dinâmica celeste. Em primeiro lugar, nota-se que a força gravitacional é proporcional ao inverso do quadrado da distância, e, portanto, diminui exponencialmente conforme aumenta a separação entre os corpos considerados. Logo, corpos muito afastados exercem pouca influência gravitacional, enquanto que corpos próximos exercem grande influência. Em segundo lugar, pode-se notar que ambas as massas contribuem para a força de atração resultante; logo, objetos não se movem rumo um ao outro, mas rumo ao centro de massa do sistema por eles definido. Por fim, o valor de G evidencia a escala de influência da força gravitacional: seu valor reduzido implica influência significativa apenas em escala astronômica (dezenas de milhares de quilômetros), sendo no geral de pouca expressão nas escalas de ação usualmente encontradas no cotidiano (metros a quilômetros).

A segunda lei de Newton diz que qualquer força pode ser entendida como o produto entre a massa e a aceleração de um corpo, e pode ser expressa matematicamente como:

$$F = ma \quad (2)$$

Se substituir-se F na equação (1) pela equação (2), obtemos uma fórmula para calcular o valor da aceleração média da gravidade de um planeta a uma distância r de seu centro de massa:

$$ma = G \frac{Mm}{r^2} \quad (3)$$

Logo:

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (4)$$

onde g é o valor da aceleração média da gravidade. Pode-se, então, substituir-se as incógnitas M e r respectivamente pela massa e raio médios da Terra, obtendo-se um valor para a aceleração média da gravidade na superfície da Terra:

$$g = 6.67 \times 10^{-11} \left(\frac{Nm^2}{kg^2} \right) \frac{5.98 \times 10^{24} kg}{(6.378 \times 10^6)^2 m} \approx 9.81 m/s^2 \quad (5)$$

Pode-se usar a equação (4) para obter o valor da aceleração da gravidade em qualquer altitude, bastando acrescentar o valor desejado ao valor do raio médio do planeta e substituindo o valor obtido em r na equação.

4.2 As leis de Kepler

Kepler, baseado em dados observacionais coletados por ele e por Tycho Brahe em anos anteriores (Faure & Mensing 2007), propôs três leis que controlam as órbitas dos planetas do Sistema Solar, conhecidas como leis de Kepler:

- i. lei das órbitas: as órbitas dos planetas são elipses com o Sol em um dos focos.
- ii. lei das áreas: uma linha ligando um planeta ao Sol varre áreas iguais em períodos iguais de tempo.
- iii. lei dos períodos: o quadrado do período de translação de um planeta é proporcional ao cubo do raio médio de sua órbita ao redor do Sol.

A terceira lei de Kepler pode ser descrita matematicamente da seguinte forma:

$$p^2 = r^3 \quad (6)$$

As Leis de Kepler são casos particulares da lei da gravitação universal (equação 1) e das Leis de Newton. Isso permite reescrever a terceira lei de Kepler em função da segunda lei de Newton e da equação para força gravitacional. Primeiramente, deve considerar-se uma órbita elíptica de excentricidade 0, portanto circular. Nesse caso, podemos escrever a força centrípeta atuando sobre o planeta como:

$$F_c = mr\omega^2 \quad (7)$$

onde F_c é a força centrípeta, m a massa do corpo, r o raio da órbita, e ω a aceleração angular. No caso de uma órbita planetária, pode-se considerar $F_c = F_g$. Portanto:

$$G \frac{Mm}{r^2} = mr\omega^2 \quad (8)$$

Uma vez que o período pode ser escrito como:

$$T = \frac{\omega}{2\pi} \quad (9)$$

Pode-se reescrever a equação (8), obtendo-se a versão newtoniana para a lei dos períodos de Kepler:

$$p^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3 \quad (10)$$

4.3 Características das órbitas elípticas

A expressão geral para uma elipse pode ser escrita como:

$$\frac{(x-h)^2}{a^2} + \frac{(y-k)^2}{b^2} = 1 \quad (11)$$

onde a é o semi-eixo maior, b o semi-eixo menor, e h e k as coordenadas do centro C da elipse nos eixos x e y respectivamente. A excentricidade da elipse é definida como:

$$e = \frac{d}{a} \quad (12)$$

onde d é a distância focal (Figura 4).

No caso de órbitas planetárias, onde o corpo mais massivo ocupa um dos focos da elipse, nota-se que a proximidade do corpo em órbita varia com o tempo (fato também evidenciado pela segunda lei de Kepler). No Sistema Solar, o ponto de maior aproximação de um planeta ao Sol é denominado de periélio, enquanto que o ponto de maior afastamento é denominado de afélio. Uma das consequências diretas é a variação na quantidade de radiação solar por unidade de área recebida pelos corpos orbitando o Sol, sendo maior no periélio e menor no afélio. Os planetas, de modo geral, apresentam órbitas de baixa excentricidade, aproximando-se de círculos (Tabela 3) (Faure & Mensing 2007).

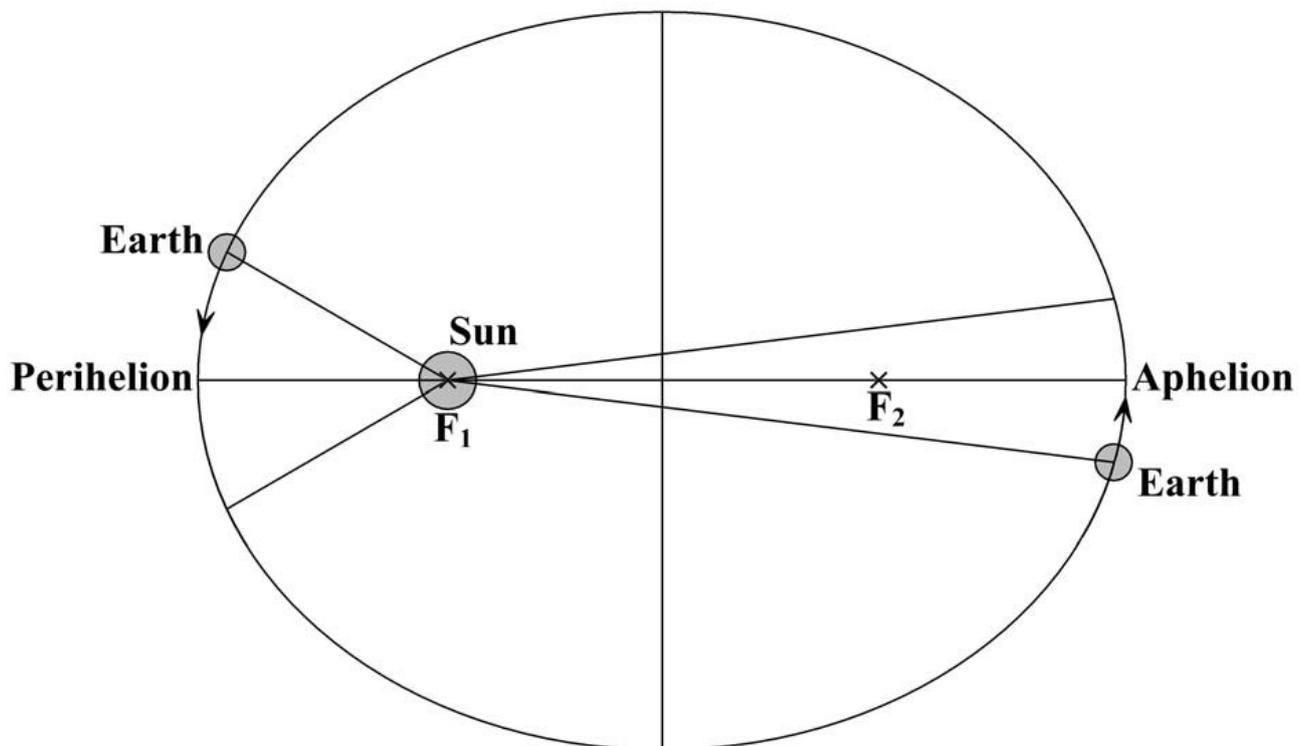


Figura 4 - Ilustração da forma geral da órbita Terra de acordo com as Leis de Kepler, que serve como modelo para os demais planetas. Pode-se notar que, em decorrência da lei das áreas, a velocidade orbital dos planetas varia conforme a posição, sendo maior no periélio e menor no afélio (uma vez que as distâncias percorridas são diferentes, embora as áreas varridas sejam iguais). $F1$ e $F2$ são os focos da elipse; a distância entre qualquer um desses pontos e o ponto definido pelo cruzamento dos dois eixos (centro da figura) é denominada de distância focal d . Fonte: Faure & Mensing (2007).

Tabela 3 - Propriedades físicas das órbitas dos planetas

planeta	excentricidade da órbita	inclinação da órbita em relação a eclíptica (°)
Mercúrio	0.206	7.00
Vênus	0.0068	3.39
Terra	0.017	0.00
Marte	0.093	1.85
Júpiter	0.048	1.30
Saturno	0.053	2.48
Urano	0.043	0.77
Netuno	0.010	1.77
Plutão*	0.250	17.12

modificado de Faure & Mensing (2007)

*Plutão é atualmente classificado como planeta anão.

4.4 Alguns fatos sobre o Sistema Solar

De acordo com Faure & Mensing (2007), a melhor forma de descrever o Sistema Solar é através da análise de certas características físicas dos corpos nele presentes. As principais são distância em relação ao Sol, densidade média, velocidade orbital média e temperatura superficial, dentre outras (Tabela 4). Esse tipo de análise evidencia diversos padrões, o que permite inferir a ação de processos que afetaram o sistema como um todo. Além disso, fornece uma base para reconhecer anomalias e, conseqüentemente, avaliar os processos locais atuantes em cada caso.

O Sol é, por grande margem, o maior corpo do Sistema Solar, concentrando cerca de 99.866% de toda a massa (Faure & Mensing 2007). Seu raio é cerca de 10 vezes maior do que Júpiter, o maior planeta do sistema solar, e mais de 100 vezes maior que o da Terra (Fig. 5). Todos os corpos do Sistema Solar são influenciados por sua gravidade.

Além do Sol, são encontrados três tipos de astros segundo a classificação da IAU: planetas (ver seção 2.6 O termo “planeta”), planetas anões (corpos com massa menor que a de um planeta, aproximadamente esféricos e que não varreram suas órbitas de outros corpos) e corpos menores do Sistema Solar (demais corpos que orbitam o Sol, insuficientemente grandes para terem forma esférica ou para varrerem suas órbitas de outros corpos). Também são encontrados diversos satélites naturais ou ‘luas’ que, embora não enquadrados na classificação da IUA¹⁰, são facilmente caracterizados pelo fato de orbitarem um dos oito planetas (Faure e Mensing 2007). Muitos desses satélites, como é o caso de diversas luas de Júpiter e Saturno, tem raios maiores do que o de Mercúrio (Faure & Mensing 2007) e, em alguns casos, são geologicamente mais ativos que alguns dos planetas, sendo portanto de grande interesse geológico.

Os planetas podem ser divididos em dois grupos principais com base em suas composições (Fig. 5). O primeiro grupo é constituído por Mercúrio, Vênus, Terra e Marte,

¹⁰A classificação a IUA não menciona especificamente corpos que orbitem os planetas do Sistema Solar, apenas mencionado-os na definição de planeta anão.

denominados de planetas rochosos. São enriquecidos em elementos refratários¹¹, como ferro e níquel, e apresentam densidades médias comparativamente elevadas (Tabela 4). O segundo grupo é constituído por Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, denominados de planetas gasosos (informalmente chamados de 'gigantes gasosos'). Suas densidades são mais baixas (Tabela 4) devido as espessas atmosferas de hidrogênio e hélio; são comparativamente enriquecidos em voláteis, incluindo água (Faure & Mensing 2007, NASA 2013b).

Tabela 4 - Propriedades físicas dos principais astros do Sistema Solar

astro	distância do Sol (UA)	raio (km)	massa (10^{24} kg)	densidade média (g/cm^3)	T superficial média ($^{\circ}\text{C}$)
Sol	-	695510	1989000	1.410	+5507
Mercúrio	0.3871	2440	0.3302	5.43	+167 (-173 a +452)
Vênus	0.7233	6052	4.865	5.20	+464
Terra	1.000	6378	5.974	5.52	+15 (-90 a +58)
Marte	1.5237	3396	0.6419	3.91	-33 (-140 a +20)
Ceres	2.768	457	0.0012	2.3	
Júpiter	5.2026	71492	1898	1.33	-123 a -153
Saturno	9.5549	60268	568.5	0.69	-113 a -153
Urano	19.2184	25559	86.83	1.318	-195*
Netuno	30.1100	24766	102.4	1.638	-204*
Plutão	39.5447	1150	0.0132	2.0	-236

modificado de: Faure & Mensing (2007)

* Temperatura a pressão atmosférica de 1 bar; entre parênteses temperaturas máximas e mínimas

A disposição dos planetas (Fig. 6 e Anexo 1) permite separar o Sistema Solar em duas porções principais. A primeira, denominada de Sistema Solar Interior, se estende do Sol até o Cinturão de Asteróides entre Marte e Júpiter. Nela estão inseridas as órbitas dos planetas rochosos, portanto empobrecida em elementos leves como hidrogênio e hélio. A outra porção, denominada de Sistema Solar Exterior, estende-se do Cinturão de Asteróides até a Nuvem de Oort, o limite da influência gravitacional do Sol, a cerca de 100000 UA¹². Nela há quantidade muito maior de voláteis, tais como a água, e, devido as temperaturas menores (no geral negativas), diversas variedades exóticas de gelo (e.g. CO_2 e N_2). O gelo está presente sobretudo na forma de objetos do tamanho de asteróides em órbitas maiores do que 102 UA e comumente denominados de objetos transnetunianos (Faure & Mensing 2007, Stern *et al.* 2015, Gladstone *et al.* 2016).

A teoria mais aceita para origem e evolução do Sistema Solar defende que todos os corpos formaram-se a partir de uma nebulosa interestrelar originada a partir da explosão de uma gigante vermelha. Parte dos gases e poeira dessa nebulosa se concentrou, originando a nebulosa solar; o material restante possivelmente originou outras nebulosas estelares próximas. A nebulosa solar se contraiu, resultando em aumento da temperatura e formação do protosol. Quando a

¹¹Elementos estáveis a altas temperaturas, como metais e óxidos (Faure & Mensing 2007).

¹²Unidade Astronômica (*Astronomical Unity - AU*), equivalente a distância média entre a Terra e o Sol, ou $1,496 \times 10^8 \text{ km}$.

temperatura do protosol atingiu cerca de 12 milhões de graus Kelvin, iniciou-se fusão nuclear através das reações próton-próton e do ciclo CNO (depende da presença de átomos de C na estrela). Assim originou-se o Sol, uma estrela amarela situada na sequência principal do diagrama de Hertzsprung-Russell¹³ e com vida estimada para ao menos 10 Ga (Faure & Mensing 2007).

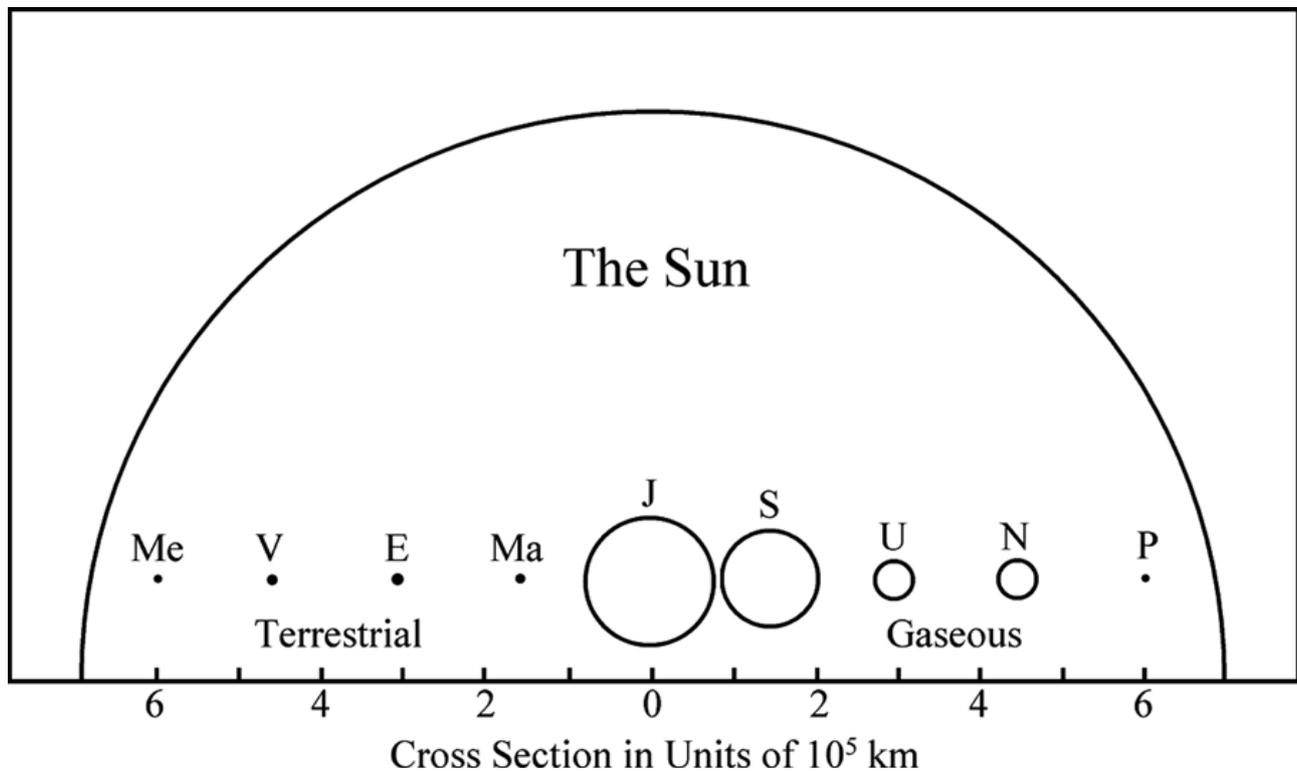


Figura 5 - Comparação entre os diâmetros do Sol e dos planetas do Sistema Solar (incluindo Plutão), desenhados em escala. Os valores dos respectivos raios podem ser encontrados na Tabela 4. Fonte: Faure & Mensing (2007).

A contração da nebulosa solar levou a drástica redução de volume e, devido a conservação de momento angular e energia, ao aumento da velocidade de rotação e temperatura. A parte do material que não se concentrou no protosol formou um disco protoplanetário que mais tarde originaria os planetas e demais corpos. Grande parte do gelo na porção interna desse disco evaporou devido ao aumento de temperatura. As partículas refratárias que ali permaneceram, como ferro, magnésio e cálcio, concentraram-se, originando planetesimais essencialmente rochosos que mais tarde originariam os planetas rochosos por meio de acreção. Na porção externa do disco formaram-se planetesimais compostos por gelo e elementos refratários, que formariam os núcleos dos planetas gasosos. O início da fusão nuclear, e consequentemente da emissão de calor e ventos solares pelo Sol, varreu o hidrogênio, hélio e outros gases das porções internas do Sistema Solar. A maior parte desses gases foi capturada pelos planetesimais de gelo e elementos refratários do Sistema Solar Exterior, originando os planetas gasosos (Faure & Mensing 2007, Cosmos: uma odisséia do espaço-tempo 2014).

Acredita-se que a conservação de momento angular mencionada também resultou na atual configuração espacial do Sistema Solar, onde as órbitas dos planetas e de parcela significativa

¹³Diagrama de classificação de estrelas com base na correlação entre luminosidade absoluta e temperatura efetiva; a grande maioria das estrelas se concentra nos arredores de uma linha, denominada de 'sequência principal'.

dos corpos maiores do Cinturão de Asteróides estão aproximadamente incorporadas em um mesmo plano aproximadamente correspondente ao do plano da eclíptica¹⁴ (Tabela 3). De acordo com essa teoria, a conservação de momento angular durante a contração levaria a concentração do movimento de rotação em um único plano, aniquilando a movimentação de objetos fora dele. Essa hipótese corrobora a teoria de formação dos planetas a partir de um disco protoplanetário de gás e poeira (Faure & Mensing 2007).



Figura 6 - Diagrama apresentando a distância das órbitas planetárias ao Sol, desenhado em escala. Os planetas seriam pontos com frações de milímetro de diâmetro. Modificação da imagem disponível em: goo.gl/1TcoqU

4.5 Sondas e outras fontes de obtenção de dados

Os dados utilizados nas Ciências Planetárias, bem como na Astronomia, provém de três fontes principais, nomeadamente sondas, telescópios e modelos, sejam eles computacionais ou análogos. De acordo com Burns (2010), até a metade da década de 1960 imperavam estudos astronômicos baseados em dados coletados por telescópios terrestres (Fig. 7a). Esses instrumentos mantiveram-se dentre as principais fontes de informação acerca de determinados alvos por mais de duas décadas, tendo ainda grande relevância nos estudos de asteróides e cometas atualmente.

Devido a algumas das propriedades da atmosfera, em especial a absorção de diversos tipos de radiação e os efeitos da turbulência na captação de imagens, a resolução dos dados obtidos na superfície da Terra é limitada. Uma forma de contornar o problema, e permitir a obtenção de dados de maior resolução, é transferir os telescópios para o espaço, onde não estarão sujeitos aos efeitos atmosféricos (Fig. 7b). Isso foi possibilitado pelos avanços tecnológicos vinculados a indústria aeroespacial iniciados com a corrida espacial durante a Guerra Fria, que não só permitiram a colocação de telescópios em órbita como possibilitaram o lançamento de instrumentos, denominados sondas espaciais (*space probes*), para outros corpos celestes (Burns 2010).

Sonda espaciais são dispositivos não-pilotados, enviados para explorar o espaço e coletar informações científicas. Podem ser classificadas em três classes de acordo com a funcionalidade: sondas interplanetárias (que voam entre corpos celestes distintos, Fig. 7c), sondas orbitais ou *orbiters* (que orbitam corpos celestes específicos; e.g. *Rosetta*), e sondas de superfície ou *landers* (pousam na superfície de corpos celestes, Fig. 7d) (*Space probes*). As *landers*, por sua vez,

¹⁴Plano de órbita da Terra, usado como referência para as órbitas de outros corpos do Sistema Solar (Faure & Mensing 2007).

podem ser subdivididas em dois tipos com base em sua mobilidade: sondas estacionárias, ou apenas *landers*, e sondas móveis, ou *rovers* (Fig. 7e).

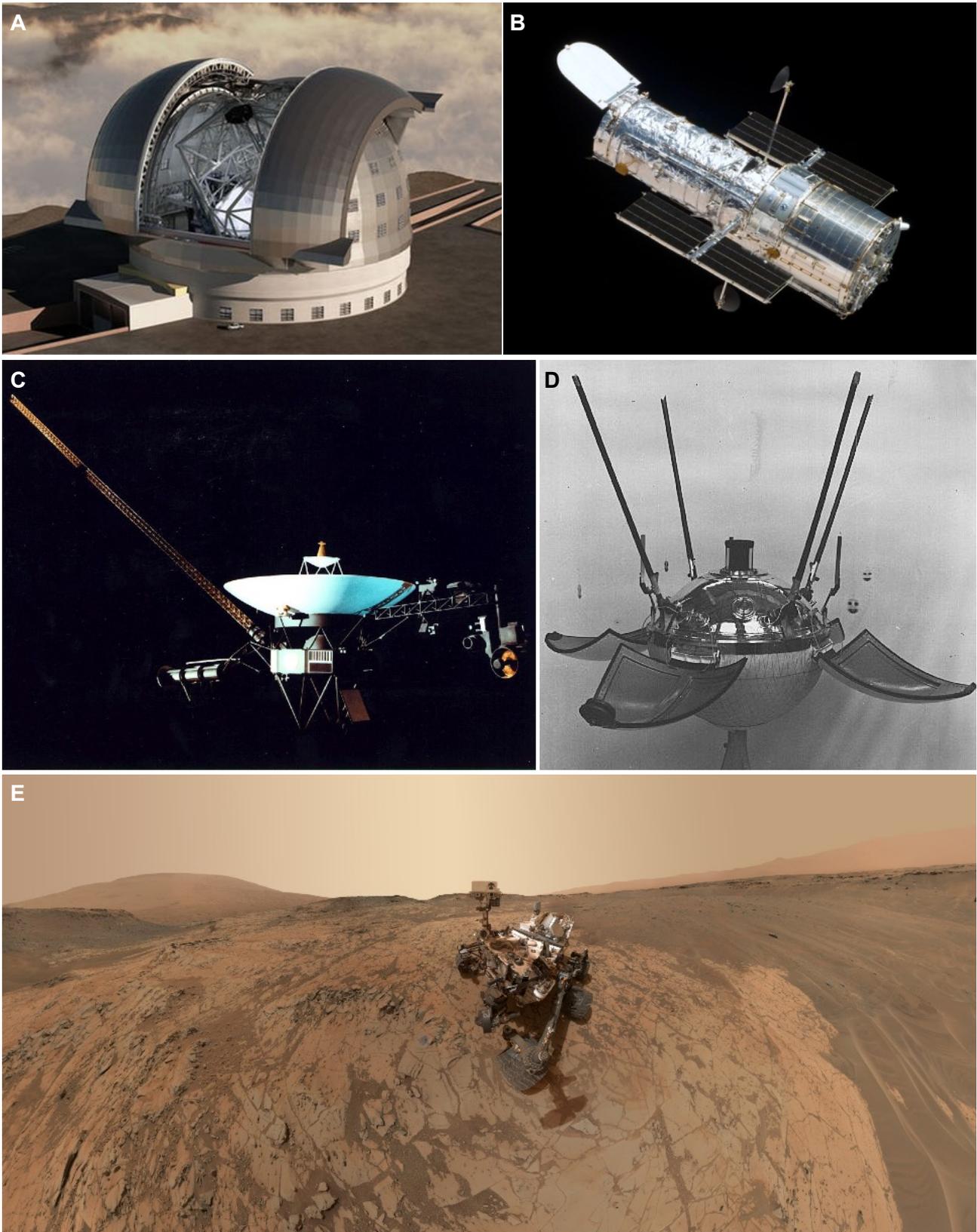


Figura 7 - Exemplos de fontes de obtenção de dados: A) Imagem do *European Extremely Large Telescope* (E-ELT), um exemplo de telescópio terrestre de grande porte. Fonte: goo.gl/mrLq1B. B) Imagem do telescópio espacial Hubble, o mais famoso telescópio espacial já construído. Fonte: goo.gl/3UIv6x. C) Imagem da sonda interplanetária Voyager 1. Fonte: goo.gl/5wnqHp. D) Imagem da *lander* Luna 9. Fonte: goo.gl/jkNtyj. E) “Auto-retrato” do *rover* Curiosity. Fonte: goo.gl/iRrpwv.

Segundo Burns (2010), o advento dessas novas tecnologias levou a drásticos aumentos da qualidade dos dados obtidos. Para sondas orbitais típicas em Marte e Saturno, obteve-se melhora de resolução de cerca de 10^5 e 10^6 vezes respectivamente em relação as imagens obtidas por telescópios, o que equivale a um aumento de aproximadamente 10^{10} e 10^{12} vezes no número de pixels. Além disso, a presença de instrumentos na órbita e superfície de outros corpos abre a possibilidade de obter dados físicos de rochas, da atmosfera e, mais importante, de encontrar feições inesperadas (Burns 2010), além de expandir o número de imagens de escala comparável a de afloramento. Imagens coletadas pela sonda *Curiosity*, por exemplo, alteraram drasticamente nossa compreensão de Marte, revelando novas estruturas em escala de afloramento antes consideradas exclusividades da Terra (e.g. Szabó *et al.* 2015, Noffke 2015). Até o momento, sondas foram enviadas aos oito planetas, bem como à asteroides e em missões para atingir os limites do Sistema Solar. Uma síntese das principais missões pode ser encontrada na Tabela 1 e no *Anexo 1 - The Chart of Cosmic Exploration* (Pop Chart Lab), que ilustra esquematicamente algumas das sondas e os caminhos por elas percorridos no Sistema Solar.

Modelos também tem papel central no estudo de corpos planetários. Existem dois tipos: modelos computacionais e modelos análogos. Modelos computacionais consistem em simulações computadorizadas de processos, baseadas em dados coletados por sondas. Modelos análogos consistem no estudo de análogos na Terra para melhor compreender as feições observadas através de comparações, envolvendo tanto o estudo de ambientes naturais como de experimentos sob condições controladas (Chapman 2007, Massé *et al.* 2016). Os últimos não só representam uma nova forma de se fazer geologia de campo, como um novo paradigma para a execução de geologia planetária avançada, no qual a integração entre trabalho humano e robótico será fundamental (Hodges & Schmitt 2011).

Outras fontes de dados incluem o estudo de meteoritos e as informações coletadas em missões tripuladas a outros astros. O estudo de meteoritos, por se tratar de um campo da ciência por si só não será abordado nesse trabalho. Todavia, é de fundamental importância, tendo fornecido pistas essenciais acerca da formação e evolução dos corpos rochosos do Sistema Solar. Missões tripuladas talvez sejam as fontes mais ricas de dados, e com certeza terão papel fundamental nas pesquisas acerca de outros planetas no futuro (Hodges & Schmitt 2011, Burns 2010). Até o momento seis missões Apollo pousaram na Lua, levando 12 astronautas, incluindo um geólogo (Fig. 8). Dentre elas, merece destaque a missão Apollo 11, a primeira missão tripulada e a primeira missão para a coleta de amostras em outro corpo planetário, sendo um marco na história humana e na história da ciência (Loff 2015).

5 Um pouco de filosofia da ciência

A importância da história e filosofia da ciência, bem como sua relevância em diversas áreas do saber, é defendida por diversos autores, sendo frequentemente abordada na literatura especializada (Martins 2007, El-Hani 2006). Essa defesa levou a elaboração da denominada 'abordagem contextual do ensino de ciências' (Matthews 1994, *apud* El-Hani 2006), que prega que o ensino "[...] das ciências deve ser acompanhada por uma aprendizagem sobre as ciências [...]" (El-Hani 2006, pg. 1). Tal proposta é contrária ao ensino restrito de ciências, denominado de

'retórica de conclusões' por Schwab (1964, *apud* El-Hani 2006), no qual apenas os produtos da pesquisa científica (isto é, os modelos e teorias mais aceitos) são apresentados aos alunos, sem considerações acerca do contexto histórico, social e cultural no qual as descobertas apresentadas foram feitas.

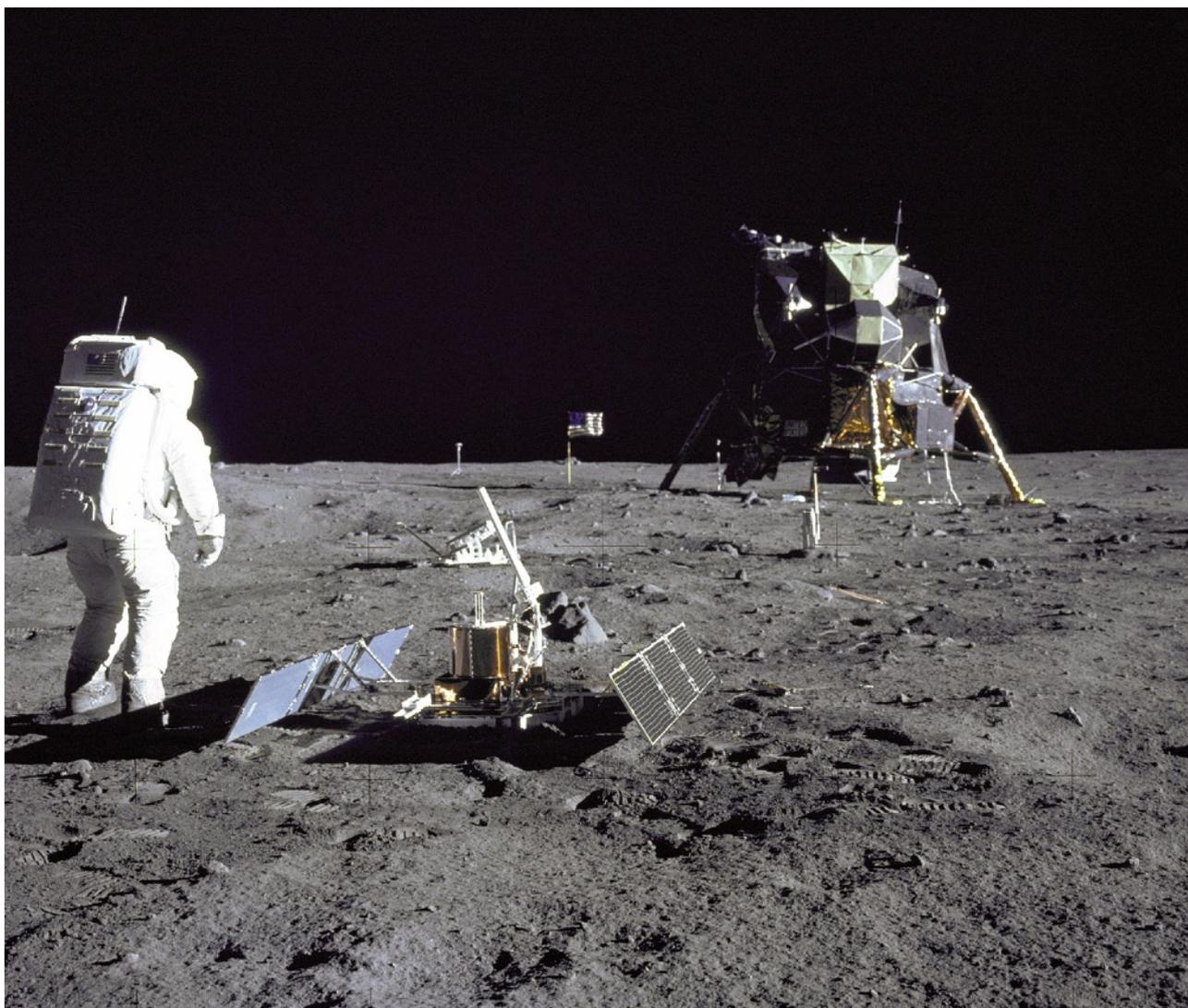


Figura 8 - Foto do astronauta e piloto do módulo lunar Buzz Aldrin durante as atividades extraveiculares da missão Apollo 11 na Lua, incluindo alguns dos equipamentos usados. Fonte: goo.gl/SQqUuU.

A compreensão, mesmo que básica, da história e filosofia da ciência é fundamental. Ao considerar-se as complexas relações entre ciência, tecnologia e sociedade, e as dimensões históricas, filosóficas e culturais das descobertas científicas e tecnológicas, torna-se clara a necessidade de bases seguras para a tomada de decisões acerca da natureza e implicações de pesquisas científicas (El-Hani 2006). Isso é de importância central para o impedimento do uso indevido dos conhecimentos científicos, sobretudo quando consideram-se conhecimentos com grande potencial destrutivo (e.g. energia nuclear e suas aplicações bélicas durante a Segunda Guerra Mundial). Além disso, é de grande valor didático, podendo ser tanto conteúdo como método de ensino em disciplinas científicas (Martins 2007).

No Brasil, a necessidade de incorporação da abordagem contextual é praticamente consensual, sendo usada para orientar parcela significativa dos cursos de licenciatura (Martins 2007). Todavia, tal consenso não se estende a todas as parcelas do ensino superior; a abordagem

referida é muitas vezes negligenciada em cursos de bacharelado e cursos técnicos de modo geral. Além disso, ela dificilmente é incorporada nos currículos de Ensino Médio (Martins 2007). Embora menções que indiquem influência de visão contextual no ensino de ciências sejam encontradas, como por exemplo na Parte III dos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, não se pode dizer que há qualquer comprometimento com a causa (El-Hani 2006).

Com o intuito de melhor avaliar as limitações das interpretações e modelos abordados nas próximas seções do texto, serão abordados, de maneira sucinta, aspectos fundamentais das filosofias de Kuhn e Popper. Suas teorias constituem alguns dos principais trabalhos na área de filosofia da ciência sobretudo no que diz respeito a natureza e limitações do que atualmente chamamos de ciência. Além disso, será apresentada a metáfora da ilha do conhecimento de Gleiser (2015), que ilustra bem diversos aspectos da ciência moderna.

5.1 O paradigma e a ciência revolucionária de Kuhn

Um dos pontos-chave da teoria de Kuhn é o conceito de paradigma. Para o autor, paradigmas são realizações científicas que “foram suficientemente sem precedentes para atrair um grupo duradouro de partidários, afastando-os de outras formas de atividade científica similares [...], [e que são] suficientemente abertas para deixar toda a espécie de problemas para serem resolvidos pelo grupo redefinido de praticantes da ciência” (Kuhn 2011, pg. 20). Em outras palavras, são realizações científicas que resultam na mudança da concepção aceita pela comunidade científica acerca de certo tema, permitindo e guiando novos avanços científicos na área em questão.

Segundo Dargains (2009), esse conceito pode ser visto como o critério de demarcação usado por Kuhn para separar as ciências empíricas das demais disciplinas. Para uma disciplina ser considerada como ciência segundo a filosofia kuhniana, é necessário que ela seja guiada por um paradigma. O paradigma unificaria as opiniões da comunidade científica, sendo por ela defendido e usado como base para novos estudos. Tal situação se contrapõe aquela definida por Kuhn como “fase pré-paradigmática”, caracterizada por divergência de opiniões e constantes questionamentos quanto a métodos e soluções de possíveis problemas vinculados a um determinado conceito (Dargains 2009).

A transição entre a fase pré-paradigmática e a paradigmática evidencia dois períodos distintos da prática científica, denominados de “ciência normal” e “ciência extraordinária” (Dargains 2009). Os períodos de ciência normal são caracterizados pela busca da solução de problemas científicos de modo análogo a resolução de quebra-cabeças (Kuhn 2011); segue regras específicas, que refletem o forte compromisso da comunidade científica centrada no paradigma em questão com um conjunto determinado de conceitos, teorias e métodos. Seguindo essa metáfora, os praticantes da ciência podem ser vistos como praticantes de “uma especialidade amadurecida de regras que lhe revelam a natureza do mundo e de sua ciência [...]” (Kuhn 2011, pg. 66). Objetiva-se o refinamento da precisão e alcance do paradigma ao invés da descoberta de resultados inesperados ou de contradições nos conceitos e teorias defendidos pela comunidade.

Esse período é seguido pelo período de ciência extraordinária, no qual a eficácia do paradigma até então defendido, passa a ser questionada. Os questionamentos culminam na

ruptura das crenças sustentadas pela comunidade, caracterizando uma revolução científica na qual o paradigma anterior é substituído por um novo. Uma vez estabelecido, o paradigma novo passa a guiar o progresso subsequente, dando origem a nova fase de ciência normal.

A sucessão de períodos de ciência normal e extraordinária torna clara a natureza não cumulativa do progresso científico. Para Kuhn, esse progresso é marcado “por uma sucessão de períodos ligados à tradição e pontuados por rupturas não-cumulativas” (Dargains 2009, pg. 32), sendo portanto revolucionário.

As fases de ciência normal, nas quais objetiva-se o aprimoramento do alcance e precisão de um paradigma, são empreendimentos altamente cumulativos. Nessas fases, os cientistas dedicam-se a resolução de problemas, muitas vezes antecipadas; as soluções dos problemas não são o foco, sendo de maior interesse a elaboração de novos métodos para alcançar os resultados antecipados dentro das diretrizes impostas pelo paradigma, ou “alcançar o antecipado de uma nova maneira” (Kuhn 2011, pg. 59). Objetiva-se não a descoberta de novos fenômenos ou a elaboração de novas teorias, mas sim a submissão da natureza aos limites impostos pelo paradigma (Dargains 2009); em outras palavras, objetiva-se melhor articular e precisar o paradigma tanto quanto for possível.

O avanço da ciência normal leva naturalmente a ciência extraordinária. Eventualmente surge um fenômeno não explicado pelo paradigma vigente, resultando na sua substituição por um novo. Alternativas ao paradigma são propostas, analisadas e comparadas, em uma série de discussões e divergências similares as da fase pré-paradigmática (Dargains 2009). Disso resulta a aceitação de um novo paradigma, que passa a guiar o progresso científico a partir desse ponto. Essa mudança é denominada por Kuhn de “revolução científica”, definida como “um deslocamento da rede conceitual através da qual os cientistas vêem o mundo” (2011, pg. 137). Ainda de acordo com o autor, o novo paradigma não seria apenas incompatível com o anterior, como incomensurável: “no novo paradigma, os termos, conceitos e experiências do paradigma anterior não só adotam um novo sentido, como também estabelecem novas relações entre si, afirmando que a comunicação entre a linha divisória revolucionária ocorre sempre de maneira parcial” (Dargains 2009, pg. 40).

5.2 O racionalismo crítico de Popper

Segundo o racionalismo crítico de Popper, a ciência consiste em um processo cumulativo no qual teorias se desenvolvem a partir do aperfeiçoamento de conhecimento prévio. O objetivo dessa filosofia é entender como se dá a construção e desenvolvimento do conhecimento, fundamentando-se no princípio da falseabilidade. O filósofo parte da premissa de que pode-se aprender com os erros do passado, sendo esses erros os guias do desenvolvimento do conhecimento (Dargains 2009).

Para Popper, um sistema teórico só pode ser reconhecido como científico se fizer asserções que permitam deduzir conclusões (também denominados de enunciados particulares) que possam ser comparadas à observações (Dargains 2009). Em outras palavras, deve ter dois aspectos fundamentais: i) seus enunciados/proposições devem ser falseáveis; e ii) deve ser construído com base em métodos, que permitem a avaliação da veracidade dos resultados

obtidos (Popper 2013). Tal sistema será testado pelo esforço de produzir as comparações referidas, ou, em outras palavras, pelas tentativas de refutá-lo a partir da submissão do(s) enunciado(s) em questão a testes ou aplicações práticas (Dargains 2009). A capacidade de ser submetido a testes que objetivam falsear o sistema é denominada de falseabilidade por Popper, sendo adotada pelo filósofo como critério de demarcação da ciência; em outras palavras, “*deve ser possível refutar, pela experiência, um sistema científico empírico*¹⁵” (Popper 2013, pg. 38).

Sistemas que admitam testes mais numerosos e rigorosos, portanto com maiores possibilidades de refutação, tem grau de testabilidade maior e, conseqüentemente, maior conteúdo informativo, uma vez que a resistência aos testes aumenta sua corroborabilidade (Dargains 2009). Logo, a testabilidade pode ser usada como critério para comparar sistemas diferentes. Todavia, tal critério não pode ser aplicado inequivocamente, uma vez que o grau de testabilidade é demasiado subjetivo para permitir comparações precisas.

Quanto a busca pela verdade, Popper defende a correspondência objetiva com os fatos como verdade, renunciando o pressuposto de que existam fontes absolutas de conhecimento. Segundo essa linha de raciocínio, todo o conhecimento é humano, portanto dotado de inúmeros erros, preconceitos, sonhos e esperanças. Logo, apenas pode-se buscar a verdade, sem nunca poder-se ter certeza de que ela foi ou será alcançada (Dargains 2009). Tal incerteza é um dos fatores fundamentais do progresso científico na filosofia popperiana, uma vez que dela resulta a constante crítica a conhecimentos estabelecidos.

O progresso da ciência, portanto, resultaria da reavaliação e modificação de conhecimentos já existentes à luz de novas hipóteses e teorias, envolvendo testes progressivamente mais rigorosos e objetivando-se aproximação à verdade (Dargains 2009). Para Popper, a teoria sempre antecede a observação, mesmo que seja sob a forma de uma ideia pouco desenvolvida. Tais ‘teorias rudimentares’ resultariam não de observações, mas de problemas práticos ou de dificuldades na aplicação ou uso de teorias existentes (Popper 1999, *apud* Dargains 2009). Desde modo, a ciência se desenvolveria numa série de sistemas dedutivos e progredindo de teoria a teoria, tendo como finalidade a busca da verdade, mesmo que está não possa ser reconhecida (Dargains 2009, pg. 28). Pode-se resumir esse ponto de vista da seguinte forma:

“A ciência jamais persegue o objetivo ilusório de tornar finais ou mesmo prováveis as suas respostas. Ela avança, antes, rumo a um objetivo remoto e, não obstante, atingível: o de sempre descobrir problemas novos, mais profundos e mais gerais, e de ajeitar suas respostas, sempre provisórias, a testes sempre renovados e sempre mais rigorosos” (Popper 2013, pg. 245).

5.3 Gleiser e a metáfora da ilha do conhecimento

Gleiser (2015) apresenta o conceito de “ilha do conhecimento” como metáfora para o entendimento das limitações do saber humano. Segundo o autor, podemos representar a totalidade do conhecimento (sobretudo científico) acumulado pela humanidade como uma ilha, por ele denominada de ilha do conhecimento. Essa ilha, bem como o conhecimento humano, está em constante evolução, com cada nova descoberta acerca do Universo representando uma alteração

¹⁵Popper usa os termos ‘sistema científico’ e ‘sistema empírico’ como sinônimos, por vezes presente como ‘sistema empírico científico’.

na sua forma. Essa evolução pode representar tanto crescimento como redução da ilha, situações equivalentes, respectivamente, a novas descobertas e a constatações de erros e consequente abandono de modelos anteriormente aceitos. As incertezas no conhecimento são representadas pela costa sinuosa, e por vezes pouco definida, da ilha, o equivalente metafórico das fronteiras do saber. A ilha é cercada por um vasto oceano, que representa o conjunto do que não se sabe acerca do Universo, denominado de oceano do desconhecido.

Segundo Gleiser (2015), o crescimento da ilha do conhecimento tem uma consequência ao mesmo tempo surpreendente e essencial para a correta compreensão dos limites do saber. Conforme cresce a ilha, mais adentram-se os territórios antes ocupados pelo oceano do desconhecido, e mais cresce o perímetro da ilha. Em outras palavras, os limites do conhecimento se expandem, permitindo olhar-se mais longe dentro do desconhecido. Consequentemente, conclui-se que o progresso na compreensão do Universo leva a um aumento nas incertezas e questionamentos sobre ele, nos afastando de um entendimento universal absoluto (também denominado de Teoria de Tudo ou de realidade última). Gleiser resume esse raciocínio quando afirma que “quanto mais sabemos, melhor entendemos a vastidão da nossa ignorância e mais perguntas somos capazes de fazer, perguntas que, previamente, nem poderiam ter sido sonhadas” (Gleiser 2015, pg. 23).

A metáfora proposta pelo autor pode ser aplicada em qualquer escala e para a grande maioria dos campos da ciência, sendo de eficácia particular na compreensão de campos de fronteira. Um dos exemplos usados pelo autor para ilustrar os usos da metáfora por ele proposta é o caso da mecânica quântica. Segundo Gleiser (2015), os avanços nesse campo, sobretudo no que diz respeito as teorias de multiverso¹⁶, geram número muito maior de novos questionamentos do que de respostas. Aplicando-se a metáfora da ilha do conhecimento, os poucos passos dados rumo ao oceano do desconhecido permitem vislumbrar número muito maior de feições misteriosas e instigadoras de novas perguntas, portanto aumentando nossas dúvidas.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado a Geologia Planetária, com resultados muito próximos. De modo geral, quando mais dados são coletados e mais descobertas são feitas, maior é o número de perguntas em aberto. As imagens enviadas pela sonda *Curiosity*, por exemplo, permitiram a Noffke (2015) correlacionar feições da superfície de Marte a feições tipicamente geradas por microbialitos na Terra, e inferir a possível presença desses organismos em Marte no passado (mais detalhes na seção 7.2 *Microbialitos em Marte*), o que levantou inúmeras perguntas acerca da evolução de Marte e da origem e evolução da vida no Sistema Solar. Outro exemplo é a descoberta, em Plutão, de feições similares aquelas geradas por processos tectônicos na Terra proporcionada pelas imagens coletadas pela sonda *New Horizons*. Os dados permitiram responder questionamentos acerca das características do sistema Plutão-Charon, mas ao mesmo tempo levantaram diversas dúvidas quanto a tectônica atuante em sistemas dominados por tipos exóticos de gelo (Stern *et al.* 2015; mais detalhes na seção 8 *O Sistema Plutão-Charon*).

¹⁶Em termos simplistas, uma das diversas interpretações da mecânica quântica é a teoria dos vários mundos ou teoria do multiverso (*many worlds theory*), segundo a qual cada possibilidade de desdobramento de um dado evento existe em um universo paralelo diferente; o conjunto de todos os universos possíveis é denominado de multiverso. Para uma explicação qualitativa, ver, por exemplo, Hawking (2001) e Hawking & Mlodinow (2012).

6 Lua, o satélite natural da Terra

A Lua é um dos corpos celestes mais reconhecidos do Sistema Solar. Consiste em um astro esférico, esbranquiçado a acinzentado e sem atmosfera (Fig. 8 e 9a). Sua superfície é marcada por diversas crateras de impacto, muitas das quais observáveis a olho nu (Fig. 9a e b). Tem ~30% do raio, ~60% da densidade, e ~1.2% da massa da Terra; por consequência, a força média da gravidade é cerca de 17% a da Terra (Tabela 5). Sua superfície pode ser dividida em duas porções principais de acordo com suas características texturais e geomorfológicas: porções planas de coloração mais escura denominadas de *maria* (plural de *mare*, termo em latin para 'mar') e porções montanhosas de coloração mais clara denominadas de *terrae* (plural de *terra*, termo em latin para 'terra') ou de 'terras altas' (do inglês *highlands*) (Faure & Mensing 2007, NASA 2013a e 2013b).

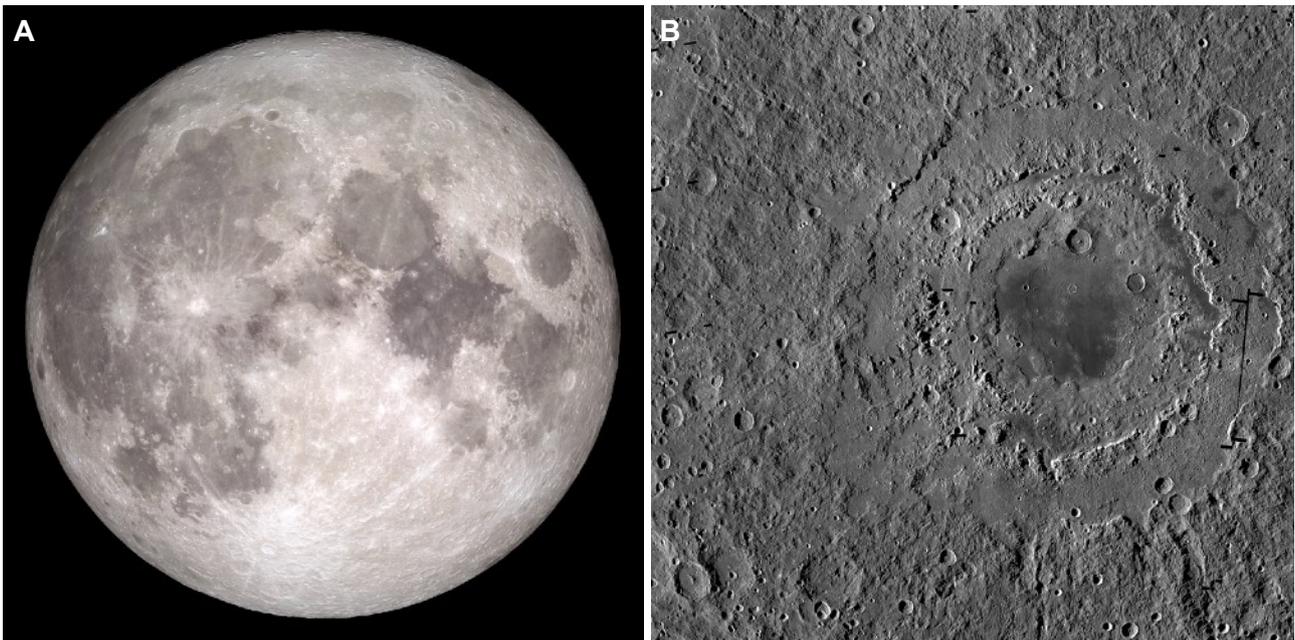


Figura 9 - A) Foto da Lua. Notar a diferença da cor entre as *highlands*, mais claras, e as *maria*, mais escuras. Fonte: goo.gl/xpEHA4. B) Mosaico de imagens obtidas pelo *Lunar Reconnaissance Orbiter* da NASA, mostrando a bacia *Orientale*. Ela tem 930km de diâmetro e três anéis distintos, formando um padrão similar a um alvo. Notar a presença de crateras de tamanhos diversos. Fonte: goo.gl/Zy44gn.

As *highlands* tem aspecto montanhoso e são cobertas por diversas gerações de crateras de impacto, de tamanhos diversos. São constituídas por rochas compostas majoritariamente por plagioclásio, cuja composição varia de gabros feldspáticos a anortositos de coloração clara (Fig. 10a). Acredita-se que os anortositos formaram-se a partir da cristalização de um oceano de magma, por meio de processos de diferenciação magmática análogos aqueles ligados a formação de intrusões ultramáficas. As *maria* são planícies aproximadamente circulares, cinza escuras, formadas a partir do preenchimento de grandes crateras por lavas basálticas (Fig. 10b). Além da forma característica, contém diversas estruturas associadas ao preenchimento das crateras por lava (e.g. canais de escoamento de lava ou *rilles*) e a sua subsequente cristalização (e.g. domos, cones vulcânicos, crateras em corrente, dentre outras) (Faure & Mensing 2007, NASA 2013a).

Tanto as *highlands* como as *maria* são recobertas por crateras e por camadas de regolito lunar. As crateras tem tamanhos diversos, com diâmetros de alguns decímetros até centenas de quilômetros. Muitas delas tem bordas elevadas e base plana, de altitude menor em relação ao

terreno circundante. As crateras maiores, em alguns casos, tem porções elevadas no centro e um ou mais anéis nas suas bases (Fig. 9b). Sua distribuição é heterogênea, apresentando maior densidade (número de crateras por unidade de área) nas *highlands*. Pode-se notar gerações distintas, diferenciadas umas das outras pelos tamanhos médios e relações de corte. O regolito lunar, por sua vez, é composto por fragmentos finos sobretudo de basalto das *maria* e de gabros feldspáticos das *highlands*, com esparsos fragmentos de vidro (formados a partir de refusão de rochas lunares durante impactos ou derivados de meteoritos) e ocasionais matações de basalto e gabro (arrancados do substrato por colisões mais energéticas). Ele forma uma camada que cobre toda a superfície da Lua, com espessura variável na escala métrica e cor cinza escura a preta (Faure & Mensing 2007).

Tabela 5 - Propriedades físicas da Lua e da Terra

propriedade	Lua	Terra
raio (km)	1738	6378
massa (kg)	7.349×10^{22}	5.98×10^{24}
densidade média (g/cm ³)	3.344	5.520
volume (m ³)	2.20×10^{19}	1.086×10^{21}
presença de atmosfera	não	N ₂ + O ₂
gravidade na superfície*	0.17 g _T	1.0 g _T
T superficial média (°C)	+130 (dia) a 180 (noite)	+60 a -90
materia da superfície	regolito (fragmentos de rocha e esferulitos de vidro)	água, gelo e rochas graníticas e sedimentares

modificado de: Faure & Mensing (2007)

*g_T = gravidade da Terra (9.81 m/s²)

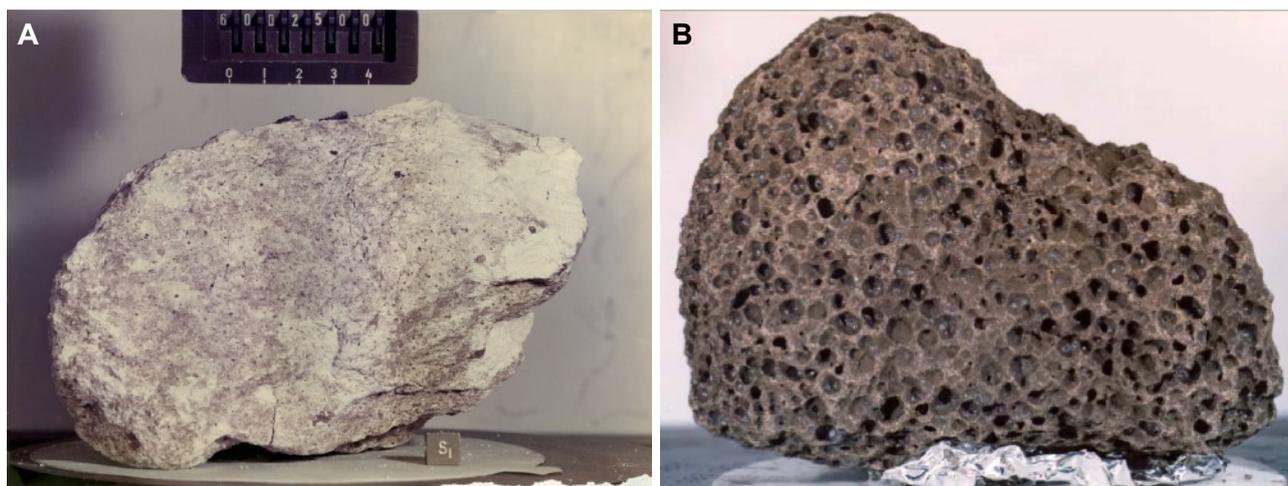


Figura 10 - A Anortosito (amostra 60025) coletado por astronautas da Apollo 16 na *Cayley Plains* próximo a cratera Descartes, nas *highlands* lunares. A amostra pesa 1.8kg e é composta de plagioclásio rico em cálcio. Sua cristalização foi há 4.41-4.51 bilhões de anos, quando a Lua ainda era jovem. Fonte: NASA/Johnson Space Center, fotografia S72-42187. **B** Basalto vesicular (amostra 15016) coletado por astronautas da Apollo 15 na base das *Apennine Mountains* no *Mare Imbrium*. A amostra é cinza escura e pesa 923g. Fonte: NASA/Johnson Space Center, fotografia S71-45477.

Não existem traços de água líquida, ou quantidades significativas de elementos voláteis, como CO₂ e N₂, na Lua. Tal fato manifesta-se através da ausência de atmosfera e de minerais

hidratados (e.g. micas, como a biotita) nas rochas lunares (Faure & Mensing 2007), com excessão de raras ocorrências de apatita (Barnes *et al.* 2014). Por consequência disso, diversos processos geológicos, sobretudo sedimentares, são ausentes. Logo, rochas sedimentares formadas a partir de sedimentos transportados por fluidos (água ou ar) não são encontradas. As únicas ocorrências de rochas quasi-sedimentares são as de brechas geradas a partir da ação de ondas de choque causadas por impactos sobre o regolito lunar (Faure & Mensing 2007). Contudo, há evidências de acumulações de gelo no fundo de crateras permanentemente cobertas por sombras nas proximidades dos pólos (Lang 2011), além de possíveis acumulações de isótopos raros de hélio (hélio-3) geradas a partir da ação dos ventos solares (Fusion energy explained 2016).

6.1 Estrutura interna da Lua

Segundo Faure & Mensing (2007), a estrutura e a composição interna da Lua foram estudadas com base em métodos indiretos, destacando-se: a) uso da variação da velocidade de espaçonaves circundando o astro; b) medições do fluxo de calor interno em superfície; c) determinação da intensidade e orientação do campo magnético; e d) medições de ondas sísmicas a partir de sismômetros em superfície.

Os registros da velocidade de espaçonaves em órbita indicam aumento relativo da velocidade sobre as *maria* e sobre crateras com diâmetros superiores a 200km. Esses aumentos foram atribuídos a maior força de atração gravitacional associada a maiores concentrações de massa em subsuperfície, denominadas de *mascons*. As medições de fluxo térmico apresentam valores equivalentes a ~20% daqueles medidos na Terra, indicando interior comparativamente mais frio. Os valores obtidos permitem estabelecer um teto para a concentração de elementos radioativos como urânio e tório na crosta lunar, uma vez que esses elementos são os principais responsáveis pelo aquecimento do interior do astro. O campo magnético lunar, por sua vez, tem força equivalente a aproximadamente 10^{-12} vezes o da Terra, portanto extremamente fraco e incapaz de deixar marcas no registro geológico. Todavia, a existência de rochas magnetizadas indica que o campo foi mais forte entre 3 e 4 Ga atrás, no período em que as grandes crateras, ou bacias, foram preenchidas por lavas basálticas (Faure & Mensing 2007).

Os dados sísmicos registrados em superfície indicam que os terremotos lunares no geral são iniciados entre 800 e 1000km de profundidade, por vezes a 100km, e que ocorrem em número muito menor em comparação aos terrestres. São atribuídos ao *stress* gravitacional gerado pela revolução da Lua ao redor do planeta. Eles ainda podem ser usados como base para elaboração de modelos acerca da composição e estrutura do interior do satélite a partir das variações nas velocidades de propagação das ondas, de modo análogo a Terra. Perfis de velocidade de ondas P (ou compressionais) evidenciam a existência de ao menos dois limites, situados a 20 e 60km de profundidade respectivamente, separando ao menos três camadas distintas a profundidades rasas (até 100km): crosta basáltica (presente apenas nas *maria*), crosta gabróica e manto peridotítico (Fig. 11a) (Faure & Mensing 2007).

De acordo com Glass (1982, *apud* Faure & Mensing 2007), os dados sísmicos disponíveis permitem dividir o manto lunar em três camadas, sendo elas o manto superior (60 a 300km), intermediário (300 a 1000km) e inferior (1000 a 1475km). O manto intermediário é a fonte

aparente da maior parte dos sismos lunares, sobretudo sua porção basal (entre 800 e 1000km). O manto inferior, por sua vez, é a única das três camadas a gerar aparente atenuação de ondas S (ou cisalhantes), sugerindo uma rigidez comparativamente menor. Por consequência, pode-se assumir que as demais camadas mantélicas são rígidas e, em conjunto à crosta, constituem uma espessa litosféra (~1000km) (Fig. 11b), proporcionalmente muito maior que a terrestre (~120km). O manto inferior, juntamente ao núcleo, integra a astenosfera lunar, com cerca de 738km de espessura (Fig. 11b).

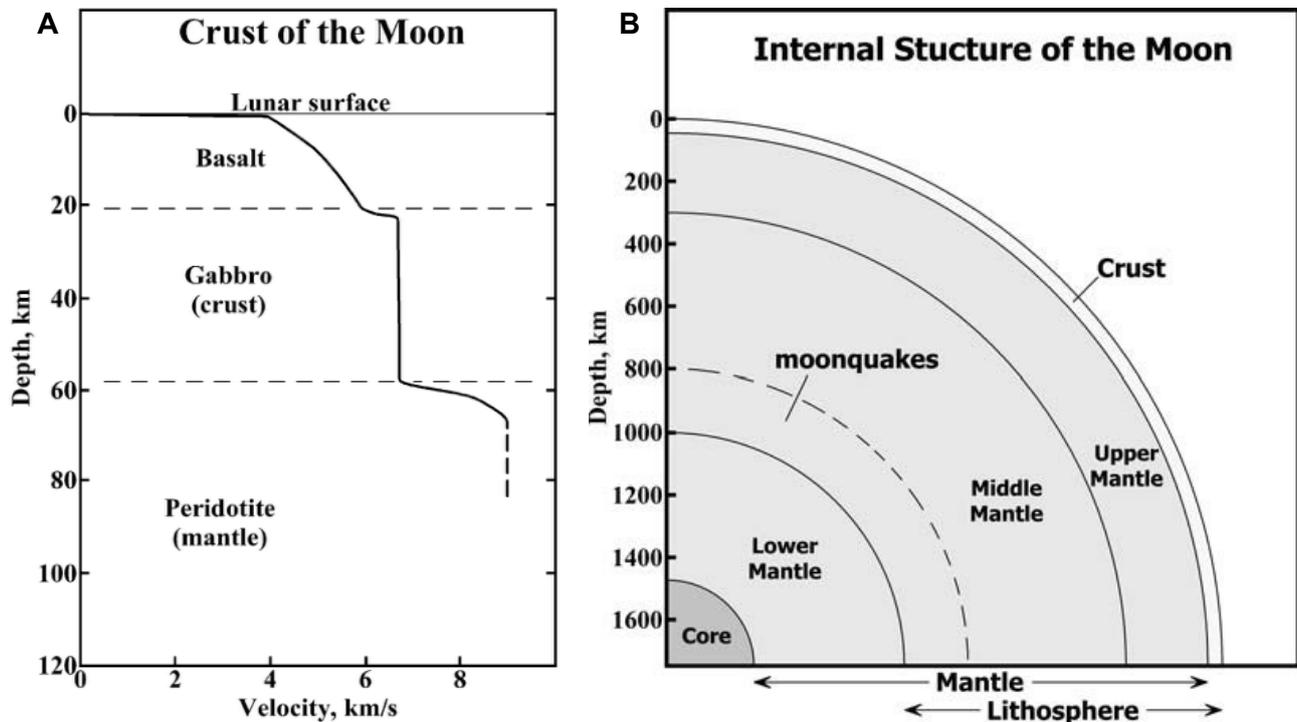


Figura 11 - A) Perfil de velocidade de propagação de ondas P até profundidade de cerca de 100km, da poção oriental do *Oceanus Procellarum* (Oceano das Tempestades ou *Ocean of Storms*). Os aumentos de velocidade observáveis a profundidades de 20 e 60km são atribuídos a transição entre camadas de composições distintas. Fonte: Faure & Mensing (2007, adaptado de Glass 1982). B) Representação da estrutura interna da Lua, ilustrando as diferentes camadas que compõem o interior do satélite. Notar a espessura da litosféra, proporcionalmente muito superior a da Terra, e o reduzido tamanho do núcleo. Fonte: Faure & Mensing (2007, adaptado de Glass 1982).

Dados acerca do núcleo são extremamente escassos, com um único registro sísmico obtido a partir de uma colisão de meteorito no lado distante (ver seção 6.2 *Peculiaridades da órbita lunar*). A não-transmissão de ondas S registrada para o centro do satélite é creditada a presença de um núcleo líquido, com espessura entre 170 e 360km e possivelmente composto por sulfureto de níquel ou por liga de níquel e ferro (Faure & Mensing 2007).

Embora a Lua seja tectonicamente inativa, acredita-se que seu interior ainda seja quente, com temperatura de cerca de 1500°C estimadas para profundidades de 1000km. A grande espessura litosférica não permite a formação de magma a partir de descompressão, resultando na inatividade tectono-magmática observada (Faure & Mensing 2007), embora indicativos de atividade eruptiva atribuída a presença de elementos radioativos nos últimos 100 milhões de anos sejam encontrados (Hand 2014). Isso se deve a maior razão entre área superficial e volume do corpo, o que permitiu seu resfriamento mais rápido. O fato também corrobora a hipótese de que

corpos menores (e.g. Lua e Ceres) esfriam mais rapidamente do que corpos maiores (e.g. Vênus e Terra) (Faure & Mensing 2007).

6.2 Peculiaridades da órbita lunar

A Lua apresenta duas peculiaridades em sua órbita ao redor da Terra. Em primeiro lugar, seu período de rotação é igual ao seu período de revolução, ambos com cerca de 27.32 dias. Como consequência, a Lua sempre tem a mesma face¹⁷ apontada para a Terra (Fig. 12a). Esse fenômeno é comum entre vários planetas e suas luas mais próximas, resultando de interações gravitacionais por meio de marés; é denominado de acoplamento de rotação-revolução 1:1 (*one-to one spin-orbit coupling*) (Faure & Mensing 2007). Em segundo lugar, seu plano orbital está posicionado de forma a possibilitar a ocorrência de ocasionais eclipses, tanto solares (quando a sombra da Lua se move sobre a superfície da Terra, portanto bloqueando o Sol) como lunares (quando a sombra da Terra se posiciona sobre a superfície da Lua, portanto impedindo que ela seja iluminada pelo Sol) (Fig. 13). A frequência de sua ocorrência é função tanto do raio da órbita (de 384.4 a 405.5 x10³ km, a depender da posição em seu caminho orbital), do ângulo do plano orbital em relação a eclíptica (cerca de 5.15° de inclinação) e da velocidade de revolução lunar (Faure & Mensing 2007, Lang 2011).

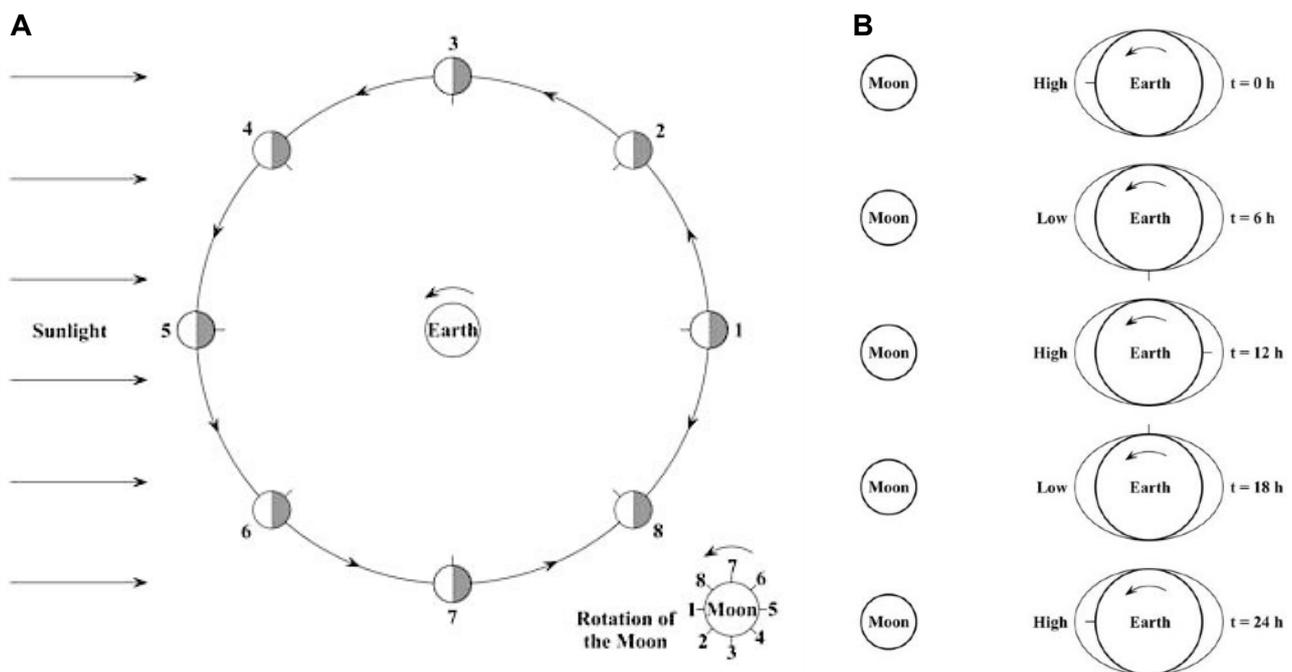


Figura 12 - A) Ilustração do movimento de rotação e revolução da Lua ao redor da Terra conforme descrito no texto. A marca representa a face da Lua apontando para a Terra. Notar a variação da iluminação do satélite ao longo de sua órbita, causa das diferentes fases da Lua. Fonte: Faure & Mensing (2007). **B)** Esquema representativo da sequência de marés altas e baixas em um determinado ponto (marca) em região costeira. Fonte: Faure & Mensing (2007).

As forças de maré (*tidal forces*) tem outras implicações significativas. Além de serem responsáveis pela ocorrência de marés oceânicas (Fig. 12b), tem importante papel na geração de calor, uma vez que as forças gravitacionais associadas também geram deformação ao longo da linha que os conecta. A atração gravitacional exercida pelos astros alonga os corpos, de modo similar as massas de água na Terra. No caso da Terra, a rotação leva a variação na orientação do

¹⁷A face apontando na direção oposta à Terra é denominada de 'lado distance' ou 'face oculta' da Lua.

campo de deformação; no caso da Lua, a variação do raio da órbita resulta na variação da intensidade da força exercida sobre as rochas. Em ambos os casos, as rochas são aquecidas (Faure & Mensing 2007, Lang 2011). Segundo Hartmann (2005, *apud* Faure & Mensing 2007), essa interação leva a redução da velocidade de rotação tanto da Terra como da Lua e ao progressivo aumento do raio de revolução lunar. Assumindo-se que este processo sempre esteve presente, pode-se deduzir que o raio da órbita lunar já foi menor (Eriksson & Simpson 2000, *apud* Faure & Mensing 2007).

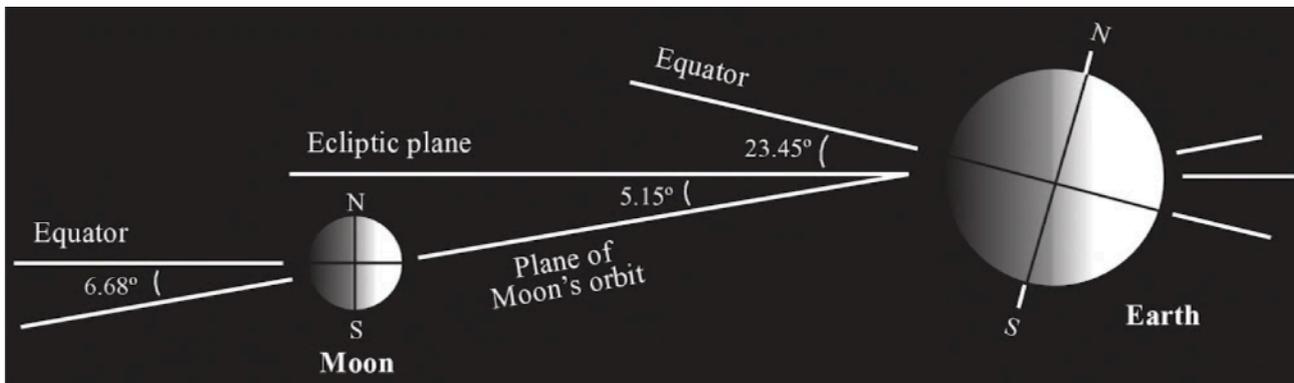


Figura 13 - Ilustração esquemática das orientações relativas da Terra e da Lua em relação a eclíptica. Notar a obliquidade do plano orbital lunar em relação a eclíptica e ao equador terrestre. Fonte: Lang (2011).

6.3 História geológica e origem da Lua

As rochas lunares nunca foram submetidas a processos de deformação tectônicos como dobramentos e falhamentos. Isso, somado a ausência de processos sedimentares ligados a movimentação de fluídos (*e.g.* transporte por água), resultou na ausência de orógenos complexos e de outras feições comumente associadas a tectônica na Terra. Por consequência, interpretações acerca da idade e evolução das rochas observáveis basearam-se na topografia, distribuição e relações de corte de unidades estratigráficas, sobretudo aquelas presentes no lado visível da Lua (Faure & Mensing 2007).

A história da Lua foi subdividida com base na correlação de sequência de crateras de impacto e episódios de atividade vulcânica associados a idades de amostras lunares. Ela é composta por quatro períodos principais, resumidos na Tabela 6. Essa divisão é usada como base para o estabelecimento das idades de outras feições em corpos rochosos no Sistema Solar, uma vez que o tamanho médio e quantidade de crateras aparenta estar diretamente relacionado com a idade das rochas afetadas (unidades mais antigas são cobertas por crateras maiores e em maior quantidade) (Faure & Mensing 2007).

Tabela 6 - Escala do tempo geológico lunar

Era	idade (Ga)	eventos característicos
Copernicana	<1.8	impactos meteoríticos ocasionais
Eratosteniana	1.8-3.2	fim do preenchimento das bacias por lava
Imbriana	3.2-4.0	preenchimento das bacias por lava
Nectariana	4.0-4.6	bombardeamento intenso e formação das bacias das <i>maria</i>

fonte: Faure & mensing (2007, adaptado de Hartmann 2005)

A teoria mais aceita para origem da Lua, informalmente denominada de teoria do corpo

impactante, atesta que o satélite foi formado a partir de material ejetado da própria Terra, como resultado do impacto com um corpo com dimensões similares as de Marte (Fig. 14). O impacto ocorreu após a Terra e o corpo terem passado por processo de diferenciação em núcleo de níquel-ferro e manto peridotítico. A colisão ocorreu em ângulo baixo, resultando na ejeção de quantidade considerável de material mantélico de ambos os corpos. O núcleo do corpo impactante foi absorvido pela Terra e incorporado ao seu próprio núcleo. O material ejetado, por sua vez, entrou em órbita, formando um disco que, mais tarde, originaria a Lua. Essa teoria explica tanto a densidade alta da Terra em relação aos demais planetas rochosos, sobretudo devido ao grande tamanho do seu núcleo, e a baixa densidade média e núcleo comparativamente pequeno da Lua (Faure & Mensing 2007, NASA 2013b). Todavia, essa teoria ainda deixa detalhes em aberto, o que atesta a necessidade de elaboração de modelos mais precisos a respeito da formação do sistema (Canup 2013).

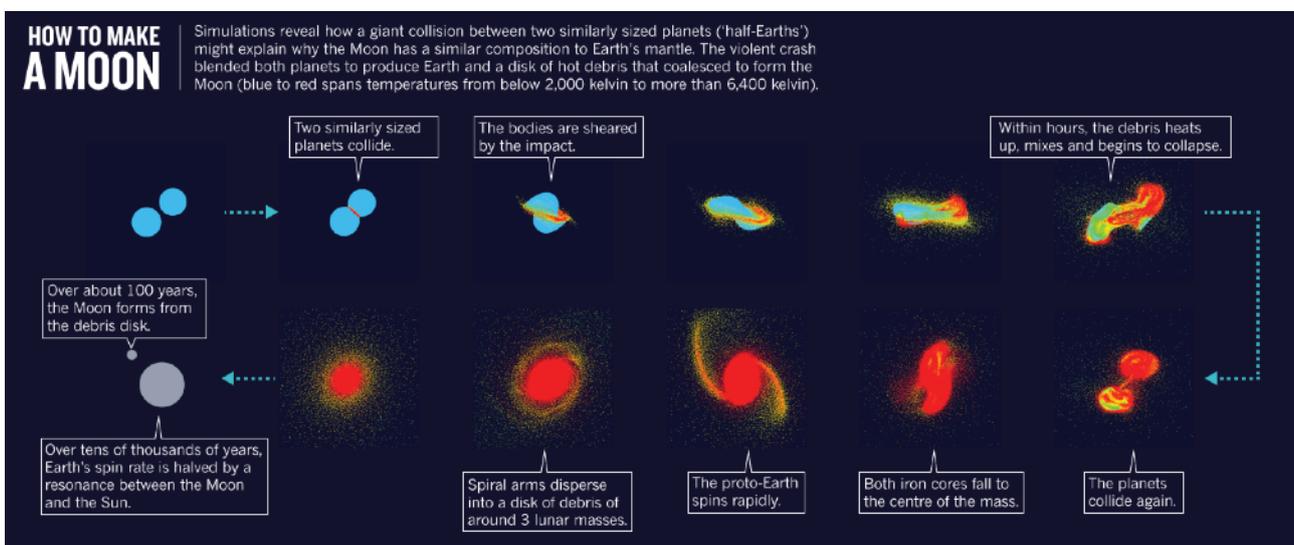


Figura 14 - Diagrama ilustrando a teoria do corpo impactante para formação da Lua, conforme descrita no texto. Fonte: goo.gl/1PasUK.

6.4 EC 1 - Inferência da migração dos pólos lunares a partir de hidrogênio polar

De acordo com Siegler *et al.* (2016), os depósitos de hidrogênio próximos aos pólos de rotação da Lua fornecem pistas sobre sua história, uma vez que só podem existir em regiões permanentemente cobertas por sombras. A atual disposição espacial desses depósitos não corresponde a distribuição esperada a partir de modelos de distribuição térmica para a superfície do satélite. Como a posição dos pólos é um dos fatores determinantes das regiões onde tais depósitos são estáveis, a não-concordância entre os dados e as previsões dos modelos referidos permite inferir que os pólos migraram com o tempo. Os autores propõem que essa mudança foi desencadeada por variações na distribuição de massa do astro associadas a vulcanismo, resultando em uma migração polar verdadeira (*true polar wander - TPW*).

A identificação dos depósitos baseou-se nos dados obtidos pelo espectrômetro de nêutrons orbitando a Lua (*Lunar Prospector Neutron Spectrometer*). Esse método é comumente dividido em três faixas, termal (de baixa energia), epitermal (de média energia) e rápida (de alta energia), cada uma fornecendo dados complementares quanto a distribuição espacial e profundidade de acumulações de elementos químicos. Ele parte do princípio de que raios

cósmicos de alta energia, ou rápidos, interagem com a superfície lunar, perdendo energia. As mudanças das propriedades dos raios refletidos pela Lua permitem estimar a distribuição de elementos em sua superfície. No caso do hidrogênio, as interações com esses raios geram grande perda energética na faixa epidermal. Portanto, anomalias baixas nessa faixa podem ser usadas como indicadores de maior abundância de hidrogênio.

Os dados coletados foram usados para mapear os possíveis depósitos de hidrogênio na Lua (Fig. 15a e b). Os resultados foram comparados a modelos de estabilidade desses depósitos baseados na distribuição térmica no astro e posições de paleopólos (Fig. 15c-f). A partir da comparação desses mapas, os autores concluíram que: i) os máximos de concentração de hidrogênio estão cerca de 5.5° separados dos pólos de rotação da Lua em ambos os hemisférios; ii) os incrementos na abundância de hidrogênio tem valores próximos em ambos os pólos; iii) as distribuições dos incrementos são discordantes em relação aos modelos termais ou atuais zonas permanentemente cobertas por sombras; e iv) a distribuição das anomalias de hidrogênio aparenta ser antipodal (distribuições simetricamente opostas).

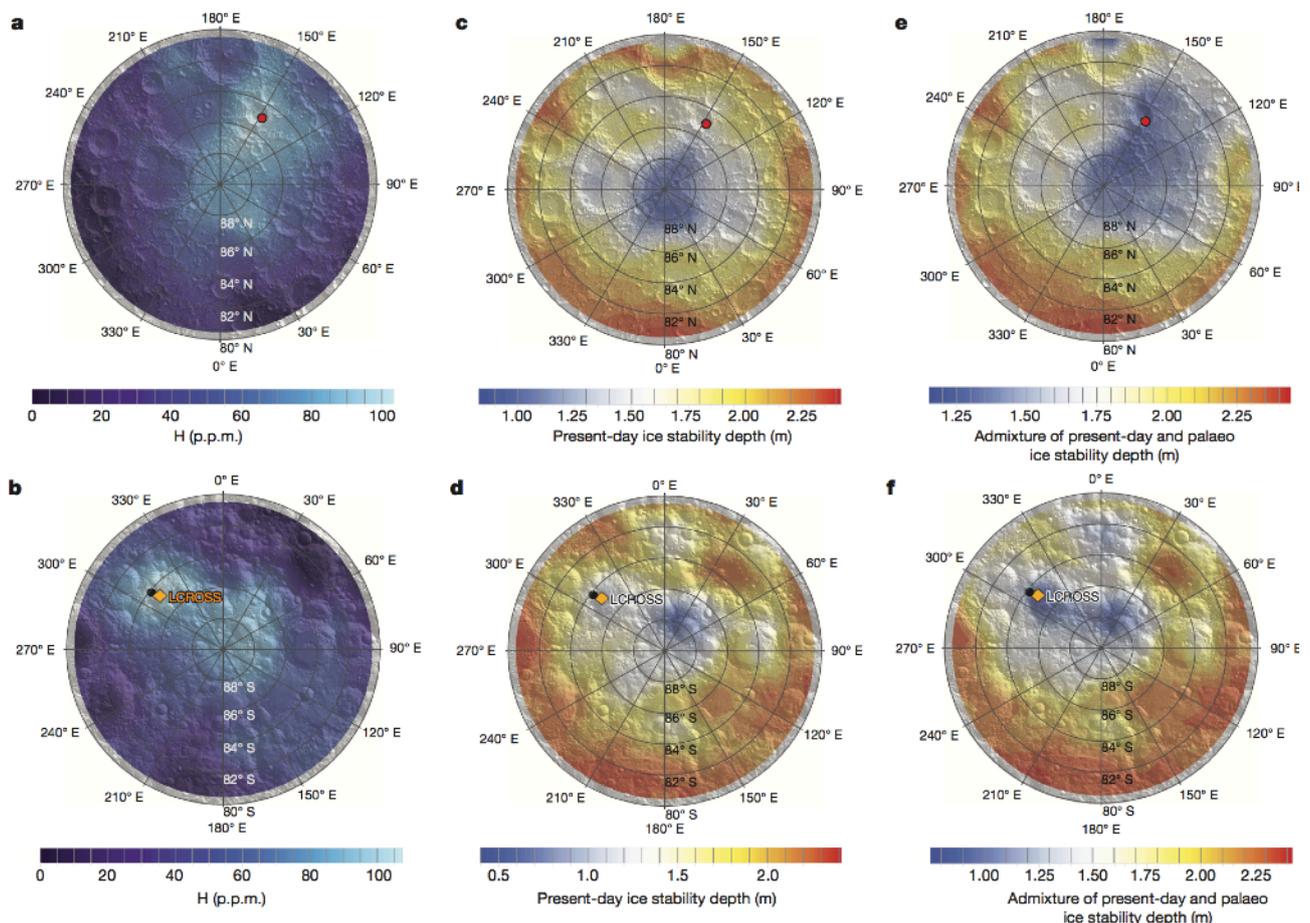


Figura 15 - a-b) Incremento da abundância de hidrogênio nos pólos norte (a) e sul (b) da Lua. **c-f)** Profundidades nas quais os depósitos são estáveis nos pólos norte (c, e) e sul (d, f), atualmente (c, d) e em uma mistura da distribuição atual e esperada para posições de paleopólos (e, f). Os círculos vermelho e preto mostram os máximos da concentração de hidrogênio nos pólos norte e sul respectivamente. O diamante laranja indica o local de impacto da *Lunar Crater Observation and Sensing Satellite* (LCROSS). Fonte: Siegler *et al.* (2016).

O caráter antipodal das distribuições de incrementos das concentrações de hidrogênio (Fig. 16a), atestado pela alta significância estatística dos resultados, sugere que os depósitos dos pólos norte e sul estão geneticamente relacionados. Siegler *et al.* (2016) interpretaram esses

dados como evidência de reorientação dos eixos de rotação do astro, assumindo que elementos voláteis (como o hidrogênio) acumulam-se em armadilhas frias (*cold traps*) condicionadas pelos pólos. Essa interpretação é corroborada pela melhor concordância entre as posições de depósitos de hidrogênio previstas pelos modelos que consideram a posição de paleopólos em relação aos modelos baseados nos pólos atuais.

A ocorrência de TPW é atribuída a redistribuições de massa em corpos planetários, uma vez que os eixos de rotação alinham-se aos eixos principais de inércia dos corpos para atingir um estado de menor energia rotacional. Se ocorrer variação na distribuição de massa de um planeta, seu eixo principal de inércia muda de posição, o que resulta na reorientação do astro (Lambeck 1980, Sabadini 2004 & Van Hoolst 2009; *apud* Siegler *et al.* 2016). Essa reorientação resulta na migração do eixo de rotação em relação a superfície do astro, como ilustrado na Fig. 16b.

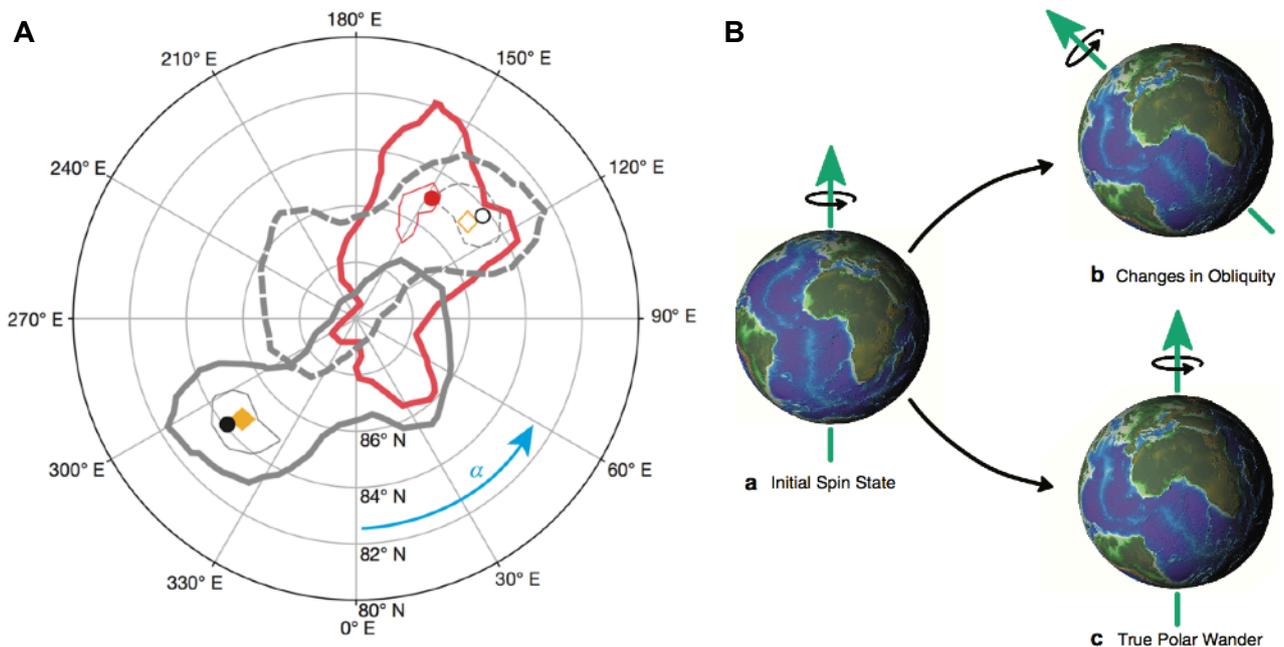


Figura 16 - A) Contornos de concentração de hidrogênio para 75ppm (linhas finas) e 100ppm (linhas grossas) nos pólos norte (em vermelho) e sul (em cinza). Os círculos vermelho e preto mostram os máximos da concentração de hidrogênio nos pólos norte e sul respectivamente. O diamante laranja mostra o local de impacto da LCROSS. As formas sem preenchimento são projeções no pólo norte. B) Ilustração de dois modos de reorientação planetária: mudança na obliquidade (b) e TPW (c).

Como a posição atual dos tensores inerciais da Lua é conhecida, pode-se testar a possibilidade de redistribuições de massa terem levado à TPW. Os autores correlacionaram previsões matemáticas a localização de diferentes feições na superfície da Lua, como crateras de impacto e regiões com composições crustais diferenciadas. Concluíram que o *Procellarum KREEP Terrane* (PKT), uma região rica em potássio, elementos terras-raras e fósforo (Jolliff *et al.* 2000, *apud* Siegler *et al.* 2016), tem dimensões e posição condizentes com as previsões, e que, conseqüentemente, sua formação pode explicar a TPW. Para testar a hipótese, os pesquisadores modelaram a evolução térmica do PKT com base no modelo de Laneuville *et al.* (2013, *apud* Siegler *et al.* 2016), obtendo resultados satisfatórios para todos os cenários nos quais a litosfera lunar é considerada como moderadamente rígida. Esses resultados corroboram previsões feitas com base no atual estado do PKT (Laneuville *et al.* 2013, *apud* Siegler *et al.* 2016) e nas

características esperadas da litosfera lunar no passado geológico (Zhong & Zuber 2000, *apud* Siegler *et al.* 2016).

Os pesquisadores ressaltam que, embora os resultados indiquem que a hipótese levantada seja válida, existem diversos outros processos que podem vir a gerar a TPW conforme observada. Logo, modelos mais detalhados, utilizando maior diversidade e quantidade de dados, devem ser feitos no futuro para verificar a validade das conclusões obtidas.

6.5 EC 2 - Origem da água na Lua primitiva revelada por amostras das highlands lunares

Segundo Barnes *et al.* (2014), a descoberta de apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$] em amostras lunares provindas tanto da superfície como de porções profundas da litosfera levou a uma mudança de paradigma a respeito da Lua, até então tida como anidra. Os autores focaram-se no estudo de razões isotópicas em amostras de rochas de partes profundas da litosfera lunar, obtendo valores próximos aos da água na Terra. Isso permite inferir que parte da água presente na proto-Terra sobreviveu ao impacto formador da Lua, ou que a água presente em ambos os astros proveio da mesma fonte, tendo sido introduzida pouco após a colisão que formou o satélite.

Os autores analisaram quatro amostras coletadas pelas missões Apollo (14303,205, 76535,51, 77215,202, e 78235,43). A análise se deu por meio de seções delgadas polidas (~30µm de espessura), montadas em resina epoxy e preparadas em ambiente destituído de água no Centro Espacial Johnson da NASA (*NASA Johnson Space Centre*). No caso das brechas, foram analisados fragmentos de rochas plutônicas, excluindo-se a matriz. As principais características das amostras estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7 - Principais características das amostras descritas por Barnes *et al.* (2014)

amostra	14303,205	76535,51	77215,202	78235,43
classificação petrográfica	brecha rica em clastos	troctolito	brecha norítica friável	norito
composição geoquímica (% volume)	33 plg, 32 fk, 23 SiO ₂ , 11 px, <1 ilm	40-50 plg, 40-50 oli, 4 de opx, min.	41 opx, 54 plg	51 opx, 48 plg,
	traços de apt, zr, Fe-Ni metálico, troilita e olivina	acessórios e mesostasis	traços de fosfatos, ilm, esp etc.	acessórios: fosfatos, vidro e veios vítreos
idade de cristalização (Ga)	4.308±0.004	~4.35	~4.4 a ~4.3	~4.35 a 4.44
exposição aos raios cósmicos (CRE) (Ma)	29	210±30	~27	292 ± 14
obsrvações	contém clastos de granitóide (fonte das datações)	aparente textura cumulática	contém fragmentos líticos com textura ígnea preservada	considerado cumulato formado entre 8 e 30km

plg = plagioclásio; fk = feldspato alcalino; ilm = ilmenita; apt = apatita; zr = zircão; esp = espinélio

Doze cristais de apatita foram selecionados e analisados por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e do uso de microsonda eletrônica (*electron probe micro-analysis - EPMA*). As concentrações de OH e composição isotópica de H foram obtidas seguindo os protocolos descritos em Barnes *et al.* (2013, *apud* Barnes *et al.* 2014) e Tartèse *et al.* (2013, *apud*

Barnes *et al.* 2014). Apenas valores obtidos para amostras inalteradas foram considerados, sendo descartadas medições de fraturas ou *hot spots* nos cristais. Foram subtraídos valores de *background* calculados para as concentrações de OH, gerados tanto em decorrência dos limites de detecção do equipamento como pela influência dos materiais usados na preparação das amostras (dentre as precauções, foram feitas medições em cristais de olivina e plagioclásio para assegurar a não-influência da resina epoxy no procedimento). Além disso, foram feitas correções para influência de produção espalagênica¹⁸, que, segundo os autores, foi de modo geral ignorada em estudos anteriores e pode influenciar significativamente nos resultados para baixas concentrações de OH (como é o caso de alguns dos cristais analisados).

Os resultados finais estão sintetizados na Fig. 17. Dois dos valores obtidos são similares a resultados publicados anteriormente; todos os demais representam concentrações consideravelmente elevadas de OH ou valores baixos de δD em relação a bibliografia. Com base nisso, os autores inferem que quantidades apreciáveis de água deveriam estar presentes durante a cristalização das rochas das *highlands* a partir do oceano de magma lunar (*lunar magma ocean* - LMO), corroborando hipóteses levantadas por Hui *et al.* (2013, *apud* Barnes *et al.* 2014).

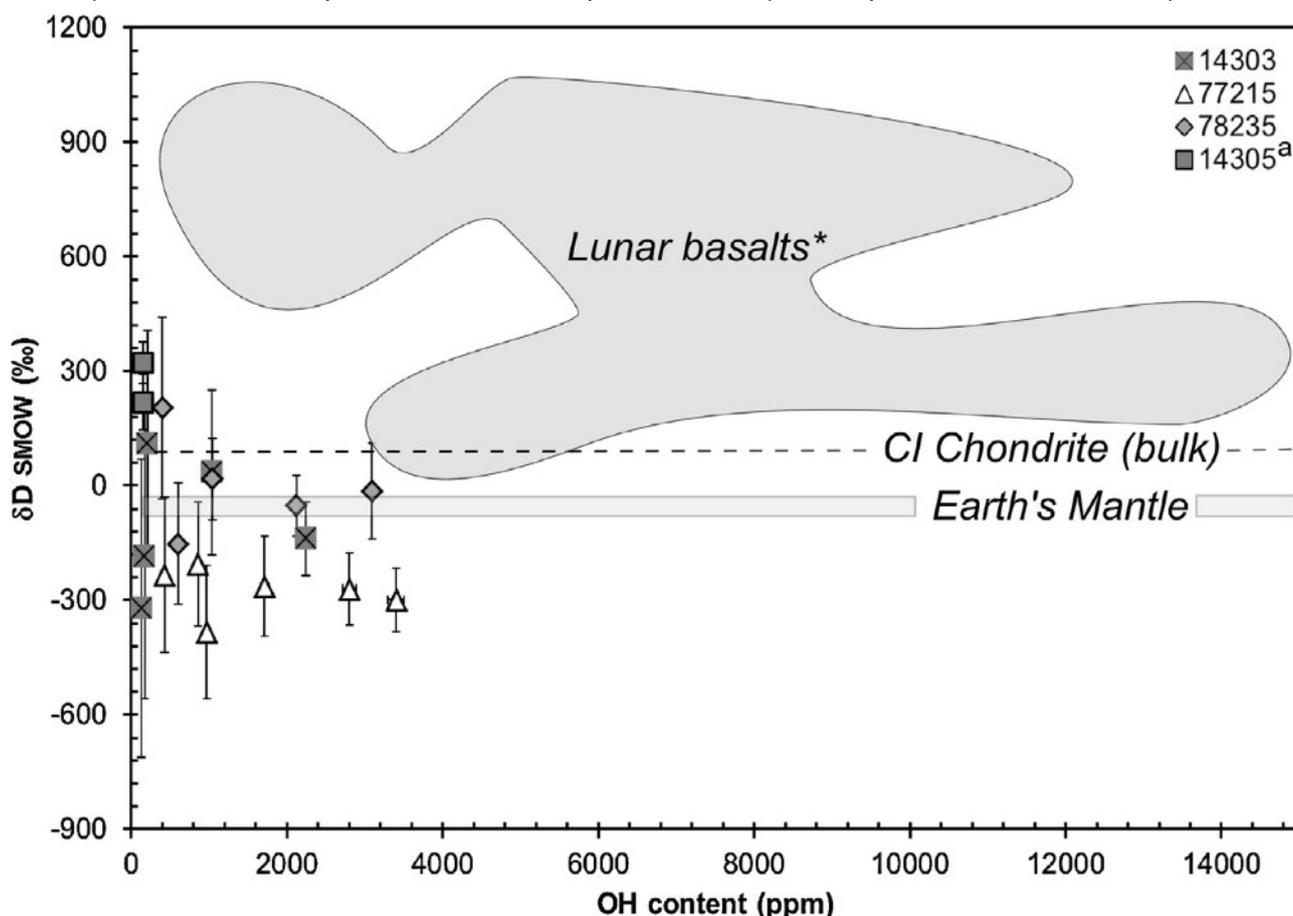


Figura 17 - Gráfico comparando os valores finais obtidos pelos autores com dados disponíveis na literatura para composição dos basaltos lunares (com base em amostras coletadas pelas missões Apollo), meteoritos basálticos lunares (Barnes *et al.* 2013, Greenwood *et al.* 2011, Tartèse *et al.* 2013; *apud* Barnes *et al.* 2014), e concentrações de OH e de δD de apatitas de rochas das *highlands* (Greenwood *et al.* 2011, *apud* Barnes *et al.* 2014). A linha pontilhada representa valores aproximados para condritos (Alexander *et al.* 2012, *apud* Barnes *et al.* 2014) e o retângulo cinza claro representa valores de δD estimados para o manto da Terra (Lécuyer *et al.* 1998; McKeegan & Leshin 2001; *apud* Barnes *et al.* 2014). Fonte: Barnes *et al.* (2014).

¹⁸Do inglês *spallogenic production*; consiste na produção de elementos leves a partir da interação e consequente quebra de elementos pesados com raios cósmicos altamente energéticos.

Embora seja clara a variação da presença de texturas e evidências mineralógicas de impactos entre as amostras (com a amostra 78235 sendo mais afetada e a 14303 menos), não foram observados *trends* de variação dos valores de δD ou das concentrações de OH. Com base nestas observações, os pesquisadores sugerem que os valores sejam assinaturas magmáticas primárias preservadas, portanto das fases iniciais de formação da Lua. Esse fato é corroborado pela natureza plutônica das amostras, o que permite excluir a possibilidade de perdas de voláteis por desgaseificação (processo que altera valores de δD primários).

Variações nas concentrações de OH também foram observadas em porções diferentes de uma mesma amostra (dispersão horizontal dos pontos na Fig. 17). Os autores atribuíram essa característica a cristalização lenta de bolsões intercumuláticos de fusão associada a falta de difusão. Isso teria preservado heterogeneidades na distribuição de OH decorrentes de texturas cumuláticas, portanto de origem primária.

A grande similaridade dos números finais obtidos por Barnes *et al.* (2014) aos estimados para o manto da Terra permitiu aos autores concluir que a água contida no sistema Terra-Lua possivelmente provém da mesma fonte. Todavia, não foi possível estabelecer se a água foi introduzida no sistema antes, durante ou depois da acreção da Lua. Duas hipóteses foram levantadas pelos autores para responder esse questionamento. De acordo com a primeira, a água do sistema proveio de uma mesma fonte, tendo sido incorporada antes da diferenciação dos corpos e após sua separação (portanto, logo após o início da acreção). De acordo com a segunda, a água foi incorporada ao sistema antes da colisão que originou a Lua, portanto herdada da proto-Terra.

7 Marte, o planeta vermelho

Marte, popularmente conhecido como planeta vermelho, é o quarto planeta do Sistema Solar e último dos planetas rochosos (Fig. 18 e Anexo 1). Consiste em um mundo desértico caracterizado por grandes vulcões, sistemas de cânions profundos (muitos dos quais maiores que o *Grand Canyon*) e extensos vales sinuosos presumidamente esculpidos por água no passado geológico. Contém campo magnético extremamente fraco, sendo quase inexistente. É envolto por uma fina atmosfera composta essencialmente por dióxido de carbono (CO_2) e por quantidades menores de gás nitrogênio (N_2) e vapor d'água (Faure & Mensing 2007, Tanaka *et al.* 2014).

A atual topografia marciana foi esculpida por processos endógenos (associados a plumas mantélicas), exógenos (associados ao extinto ciclo da água e a outros processos sedimentares) e “extra-marcianos” (colisões de meteoritos). O hemisfério norte do planeta inclui planícies baixas (*planitiae*), grandes escudos vulcânicos e riftes tectônicos, com poucas crateras. O hemisfério sul, por sua vez, é dominado por crateras de impacto e centros vulcânicos, indicando maior idade em relação ao hemisfério norte (Faure & Mensing 2007, Head 2007).

As diversas feições topográficas do planeta são referidas utilizando-se termos específicos, como é feito para Vênus e para outros astros rochosos do Sistema Solar. *Planitia* são longas planícies de baixa altitude, *planum* são regiões planas situadas a altas altitudes, montanhas são denominadas de *mons* (singular) ou *montes* (plural), vales são referidos como *vallis* (singular) ou *valles* (plural), *rift valleys* são denominados de *fossa*, e cânions de *chasma*. Além disso, certas

feições topográficas são descritas com frases em latim, como *Vastitas Borealis* (vastidão do norte) ou *Noctis Labyrinthus* (labirintos da noite) (Faure & Mensing 2007).

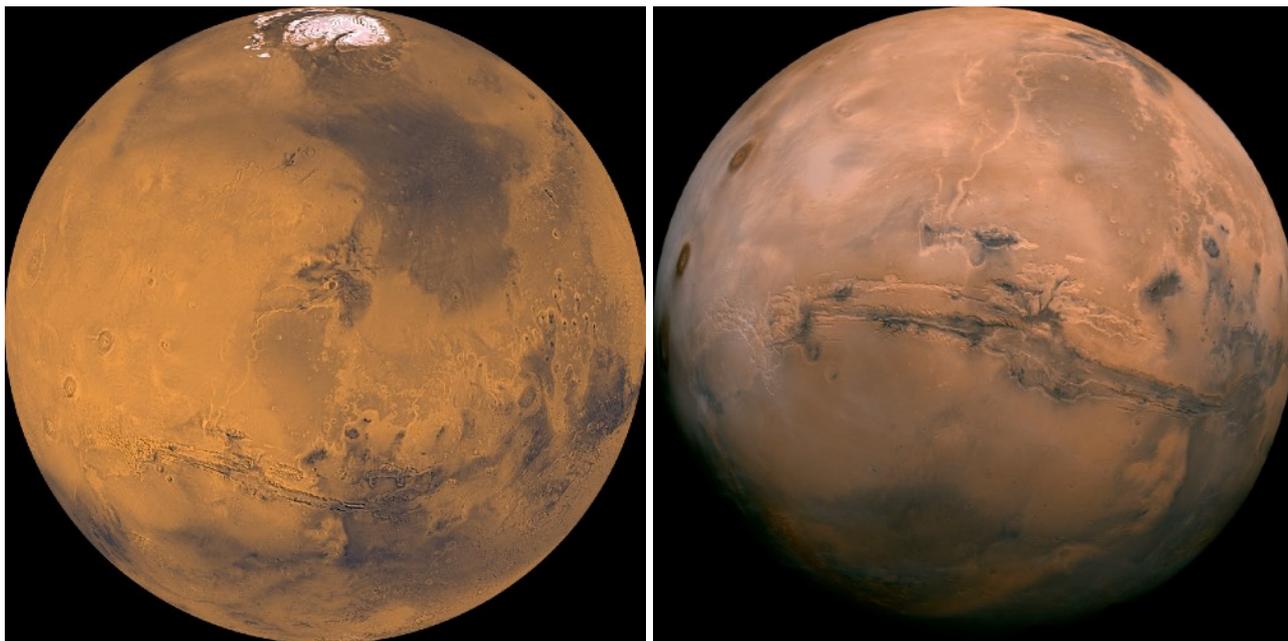


Figura 18 - Imagens de Marte obtidas pela NASA, mostrando diversas das feições características do planeta visíveis em órbita, como crateras de impacto e *chasma*. A variação na cor entre as duas figuras é consequência de diferentes tratamentos computacionais das imagens. Fontes: goo.gl/pl5fla e goo.gl/5SJUbp.

Marte possui dois satélites naturais nomeados Phobos e Deimos (Tabela 8). Ambos apresentam revolução prográdacional e acoplamento de rotação-revolução 1:1, como a Lua. Tem formato irregular, superfície escura e são cobertos por crateras de impacto, o que indica idades de formação próximas a 4.6 Ga (Hartmann 2005, *apud* Faure & Mensing 2007). Essas propriedades, somadas a baixa densidade dos corpos (comparável à de condritos ricos em carbono, do tipo I), permitem inferir que as luas são corpos menores (*e.g.* asteróides) capturados em algum ponto da história de Marte (Faure & Mensing 2007).

Tabela 8 - Características orbitais e físicas das luas de Marte

propriedade	Phobos	Deimos
raio médio da órbita (km)	9378	23460
período sideral de revolução (sol)	0.319 (7.656h)	1.263 (30.312h)
período sideral de rotação (sol)	0.319 (7.656h)	1.263 (30.312h)
eccentricidade da órbita	0.01	0.00
diâmetro (km)	28x23x20	16x12x10
massa (kg)	1.1×10^{16}	1.8×10^{15}
densidade média (g/cm ³)	1.950	1.760

fonte: Freedman and Kaufmann (2002) e Hartmann (2005), *apud* Faure & Mensing (2007)

Phobos completa 3.2 voltas ao redor do planeta a cada dia marciano (sol). O resultado da interação gravitacional entre ela e Marte resulta no aumento da velocidade de rotação de Marte e decaimento da órbita (redução do raio orbital) de Photos. Deimos, por sua vez, completa menos de uma revolução a cada sol (Tabela 8). A interação gravitacional entre essa lua e o planeta tende

a reduzir a velocidade de rotação de Marte e a aumentar o raio orbital do satélite (Faure & Mensing 2007). Disso decorre a inevitável previsão de perda das luas em algum ponto do futuro, embora a evolução da rotação do planeta seja imprevisível.

7.1 Origem de Marte

Marte formou-se ao mesmo tempo e por meio dos mesmos processos que originaram os demais corpos planetários do Sistema Solar. O planeta foi formado a partir da acreção de um disco planetário situado a aproximadamente 1.52 UA do Sol, o que pode ter resultado em maior abundância de elementos voláteis em relação aos demais planetas rochosos. Ele passou pelos mesmos processos de aquecimento e posterior diferenciação e segregação gravitacional experienciados pelos demais corpos planetários, resultando na diferenciação de crosta, manto e núcleo (Faure & Mensing 2007).

Acredita-se que, assim como na Terra, tenha se formado uma crosta anortosítica a partir do oceano de magma presente nos estágios iniciais de formação de Marte. Contudo, traços dessas rochas não foram encontrados até o momento, o que permite levantar a hipótese de que foram soterradas por material ejetado durante as inúmeras colisões ocorridas na fase de bombardeamento intenso entre 4.6 e 3.8 Ga (Faure & Mensing 2007).

Segundo Faure & Mensing (2007), a crosta marciana é composta por derrames de lava intercalados a rochas sedimentares diversas (Fig. 19) e depósitos de material ejetado por colisões de meteoritos. Acredita-se que o manto do planeta seja sólido e composto por rochas ultramáficas (e.g. peridotitos) formadas a partir da acumulação de minerais de alta densidade (e.g. olivina e piroxênio) cristalizados no oceano de lava e separados do resto da fusão por processos de segregação gravitacional.

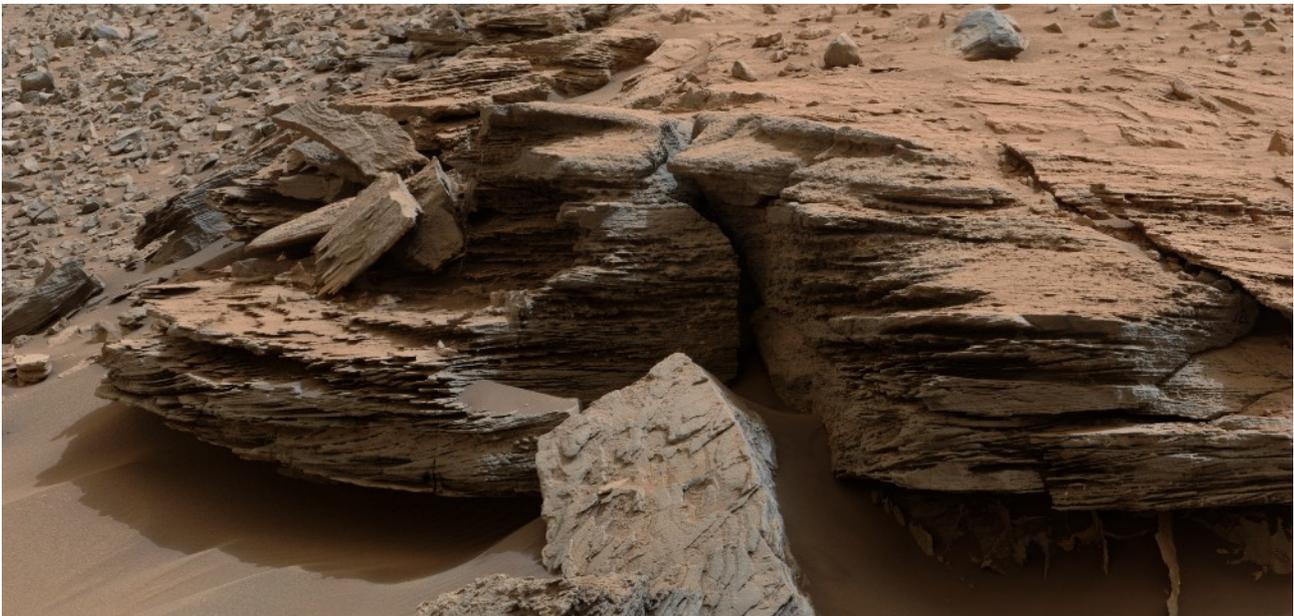


Figura 19 - a) Exemplo de estratificação cruzada em rochas sedimentares do alvo *Whale Rock* obtida pelo rover *Curiosity* em novembro de 2014. Fonte: goo.gl/e8WU5V.

A presença de grandes escudos vulcânicos (*shield volcanoes*), incluindo os maiores do Sistema Solar, permite inferir que a convecção na astenosfera marciana deu-se sobretudo através de plumas mantélicas. Esses vulcões atingiram grandes tamanhos devido a litosfera estacionária

(há apenas uma placa tectônica, que cobre todo o planeta) e a ausência de tectônica de placas. Isso impossibilitou a reciclagem de rochas crustais e, conseqüentemente, a formação de fusões graníticas (Faure & Mensing 2007, Head 2007), além de concentrar a atividade vulcânica em pontos específicos, favorecendo o crescimento dos edifícios vulcânicos.

7.2 Propriedades físicas e evolução de Marte

Algumas das principais propriedades físicas de Marte estão resumidas na Tabela 9. Em relação a Terra, Marte tem ~50% do raio, ~15% do volume e ~10% da massa. Sua área superficial corresponde aproximadamente a área superficial dos continentes terráqueos, e a força da gravidade em superfície equivale a cerca de 38% da força da gravidade na Terra. A pressão atmosférica em superfície equivale a ~0.006 vezes a da Terra, o que, somado as baixas temperaturas superficiais, impossibilita a existência de água líquida (ver seção 7.5 *Água e possibilidade de vida fora da Terra*). Não apresenta campo magnético atualmente, embora rochas magnetizadas forneçam indícios quanto a existência de um no passado (Faure & Mensing 2007).

Tabela 9 - Principais características físicas de Marte e da Terra

propriedade	Marte	Terra
raio (km)	3394	6378
massa (kg)	6.42x10 ²²	5.98 x10 ²⁴
densidade média (g/cm ³)	3.924	5.520
volume (km ³)	1.636x10 ¹¹	10.86 x10 ¹¹
atmosfera	CO ₂ + N ₂	N ₂ + O ₂
gravidade na superfície*	0.38 g _T	1.0 g _T
T superficial média (°C)	-53 (+20 a -140)	+9 (+60 a -90)
materia da superfície	rochas ígneas e sedimentares e seus produtos intempéricos	rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, solo, água e gelo

modificado de: Faure & Mensing (2007)

*g_T = gravidade da Terra (9.81 m/s²)

A composição da crosta, manto e núcleo de Marte foi estimada por Taylor (1992, *apud* Faure & Mensing 2007) com base no estudo de meteoritos marcianos. O manto e a crosta do planeta são essencialmente compostos por silicatos de Mg e Fe, dado consistente com a composição basáltica de porções da crosta. As concentrações de Al₂O₃ e de CaO são baixas, respectivamente 3.02 e 2.45%; as concentrações de TiO₂, Na₂O, K₂O, P₂O₅ e Cr₃O₂ somam apenas 1.6% do total. O núcleo, por sua vez, concentra ~21% da massa do planeta, extendendo-se por cerca de 50% do raio. Ele é composto por ferro metálico (77.8%) em liga com níquel (7.6%), cobalto (0.36%) e enxofre (14.24%), possivelmente com quantidade reduzida de outros metais que apresentam afinidade geoquímica a esse elemento (*e.g.* Cu, Mo, Zn).

A atmosfera de Marte mudou consideravelmente com o tempo. A atmosfera primordial era composta por vapor d'água, dióxido de carbono e outros gases liberados durante a acreção planetária e por vulcões em fases subseqüentes da evolução do planeta. A pressão atmosférica

era muito maior que atual, possivelmente igualando-se a de Vênus. O resfriamento do planeta levou a precipitação de grande parte do vapor d'água, resultando na formação de acumulações de água líquida em superfície, resultando em paisagens similares as da Terra atual (excetuando-se talvez a presença de vida). Concomitantemente, dióxido de carbono foi retirado da atmosfera, levando a redução do efeito estufa planetário e a consequentes quedas das temperaturas globais em superfície. Em decorrência do intenso bombardeamento entre 4.6 e 3.8 Ga, grande parte dos voláteis em superfície foi perdida. Embora a Terra tenha passado pelo mesmo processo, os efeitos foram mais impactantes em Marte, sobretudo devido ao seu tamanho comparativamente menor e a ação dos ventos solares. Por consequência, grande parte da atmosfera foi perdida, tendência que continuou até a quase totalidade da água do planeta ter escapado para o espaço e resultou na atual atmosfera de dióxido de carbono e gás nitrogênio (Faure & Mensing 2007, Tanaka *et al.* 2014, Norton 2015).

Sua órbita é quase concordante ao plano da eclíptica (1.85° de inclinação). Tem raio médio igual a 1.524 UA e período sideral de rotação equivalente a 686.98 dias ou 1.880 anos terrestres por revolução. Um dia em Marte, denominado de sol, dura 37'22" a mais do que um dia terrestre, portanto equivalente a cerca de 24h40min ou 1.0259 dias terrestres. Assim como a Terra, Marte apresenta inclinação em seu eixo de rotação (25.19°), resultando na ocorrência de estações. Seu maior período de revolução implica maior duração das estações, de 171.7 dias cada em comparação aos 91.3 dias da Terra (Faure & Mensing 2007, Tanaka *et al.* 2014).

7.3 Características da superfície marciana

A superfície de Marte pode ser dividida em grandes compartimentos geológicos com base nas feições topográficas em escala global. Essa divisão foi usada como base para a elaboração do mais recente mapa geológico de Marte (Tanaka *et al.* 2014), disponível como Anexo 2.

Grandes partes da porção sul e regiões restritas da porção norte do planeta são cobertas por *highlands* acidentadas e marcadas por inúmeras crateras de impacto (Fig. 20a). Em sua maior parte, tem entre 0 e 5000m de altitude com relação ao *datum*¹⁹, embora feições como *Arabia Terra* tenham entre 0 e -3000m. Existem planícies em meio as *highlands* do hemisfério norte, com elevações entre -4000 e -5000m. Apresentam número muito menor de crateras em relação as *highlands* circundantes, indicando que foram cobertas por rochas mais novas e sedimentos diversos (Tanaka *et al.* 2014). Segundo Tanaka *et al.* (2014), muitas das crateras dessa região evoluíram para bacias sedimentares. As três principais bacias originadas nesse contexto são chamadas de *Hella*, *Isidis* e *Argyre*, com diâmetros de 2400, 1500 e 900km respectivamente. Além delas, há a *Utopia Planitia*, uma planície situada no interior de uma bacia circular com quase 3000km de diâmetro e interpretada como formada por processo similar as demais (Fig 20b).

As transição entre as *highlands* do sul e as terras baixas do norte é marcada por grande diversidade de feições topográficas, como escarpas, mesas e platôs, que acomodam diferenças de altitude de centenas a milhares de metros. Tais feições cobrem grande área entre as porções sul da *Acidalia Planitia* e porção leste da *Amazonis Planitia*. Essa região também abriga um gigantesco sistema de cânions lineares com mais de 2000km de extensão, denominado de *Valles*

¹⁹O *datum* marciano é definido como o raio médio do planeta (Smith *et al.* 1999, 2001; *apud* Tanaka 2014).

Marineris (Fig. 20c). Ele margeia o limite norte do platô *Thaumasia*, estendendo-se do *Noctis Labyrinthus* até a margem leste da elevação *Tharsis*, uma das feições topográficas mais reconhecíveis no planeta (Fig. 21a). O sistema de cânions referido conecta-se com campos dominados por *knobs* e mesas, região fonte dos canais do *circum-Chryse*. Esses canais tem profundidades quilométricas e alguns milhares de quilômetros de comprimentos, cortando porções das *highlands* antes de adentrarem a *Chryse Planitia* (Tanaka *et al.* 2014).

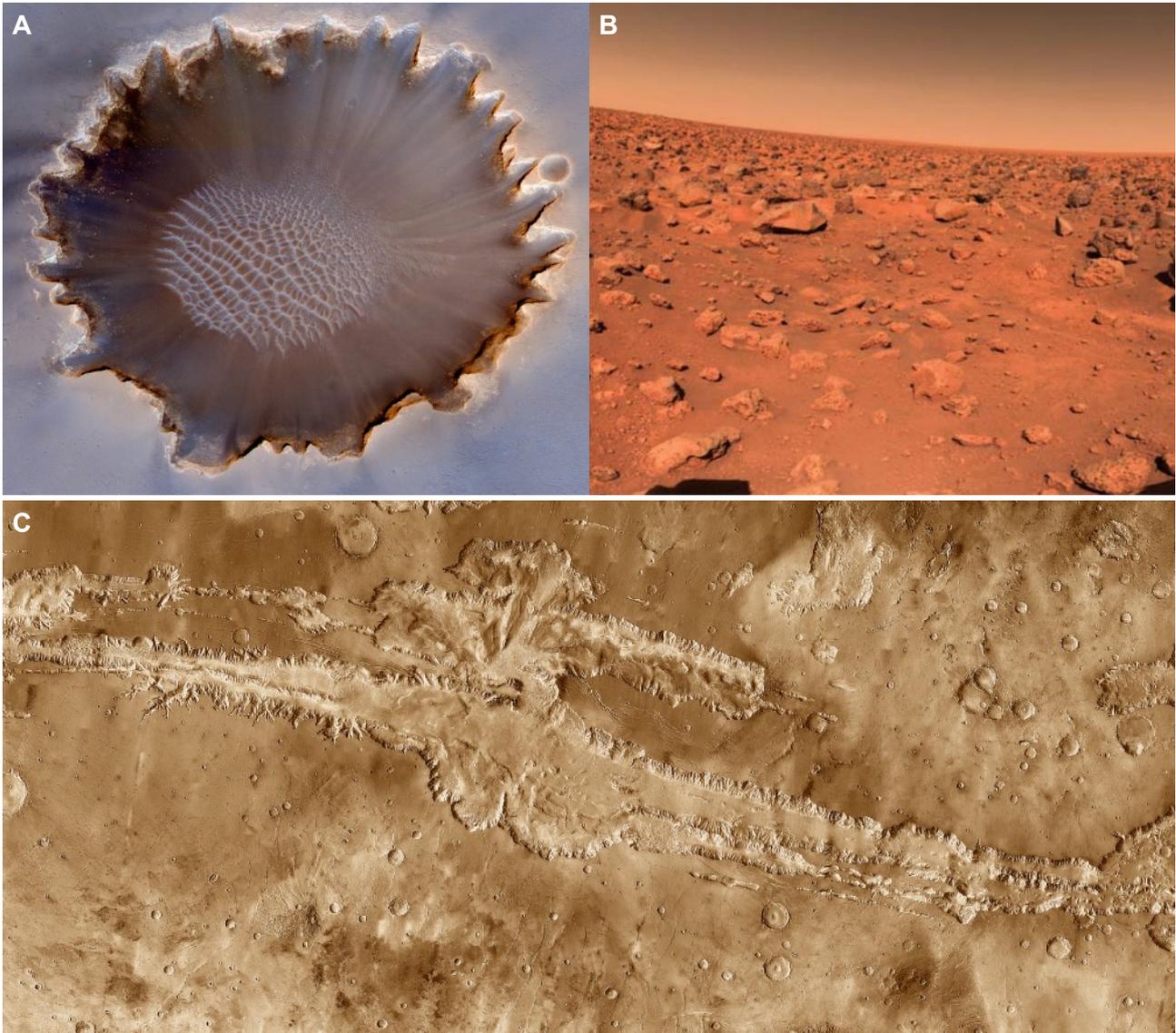


Figura 20 - A) Imagem da cratera *Victoria*, obtida pela câmera *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE) a bordo do *NASA's Mars Reconnaissance Orbiter*. Fonte: goo.gl/JGE7N6. B) Imagem da *Utopia Planitia* obtida pelo *lander Viking 2*. Fonte: goo.gl/XHj5fb. C) Imagem do *Valles Marineris*, um dos maiores sistemas de cânions conhecidos no Sistema Solar. Fonte: goo.gl/KkDvns.

A dominância de plumas mantélicas na evolução dos sistemas vulcânicos em Marte resultou em centros vulcânicos concentrados e de longa duração, o que levou a formação de elevações (*rises*), escudos (*shield*), platôs (*plateaus*) e edifícios vulcânicos de grande porte (Faure & Mensing 2007, Tanaka *et al.* 2014). A elevação *Tharsis* é uma das feições morfológicas mais reconhecidas (Fig. 21a). Ela consiste em um conjunto de derrames com diâmetros superiores a 5000km na direção leste-oeste e a 6000km na direção norte-sul. Seu topo é capeado por alguns dos maiores edifícios vulcânicos conhecidos no Sistema Solar, incluindo *Olympus Mons* (Fig. 21b),

Alba Mons, e os três *Tharsis Montes* (*Ascraeus Mons*, *Pavonis Mons*, e *Arsia Mons*) (Fig. 21a). A elevação também contém diversos centros efusivos menores e terrenos tectonicamente deformados, como partes do *Tempe Terra*, *Noctis Fossae*, *Claritas Fossae*, *Ceraunius Fossae*, e das *highlands Thaumasia* (Tanaka et al. 2014).

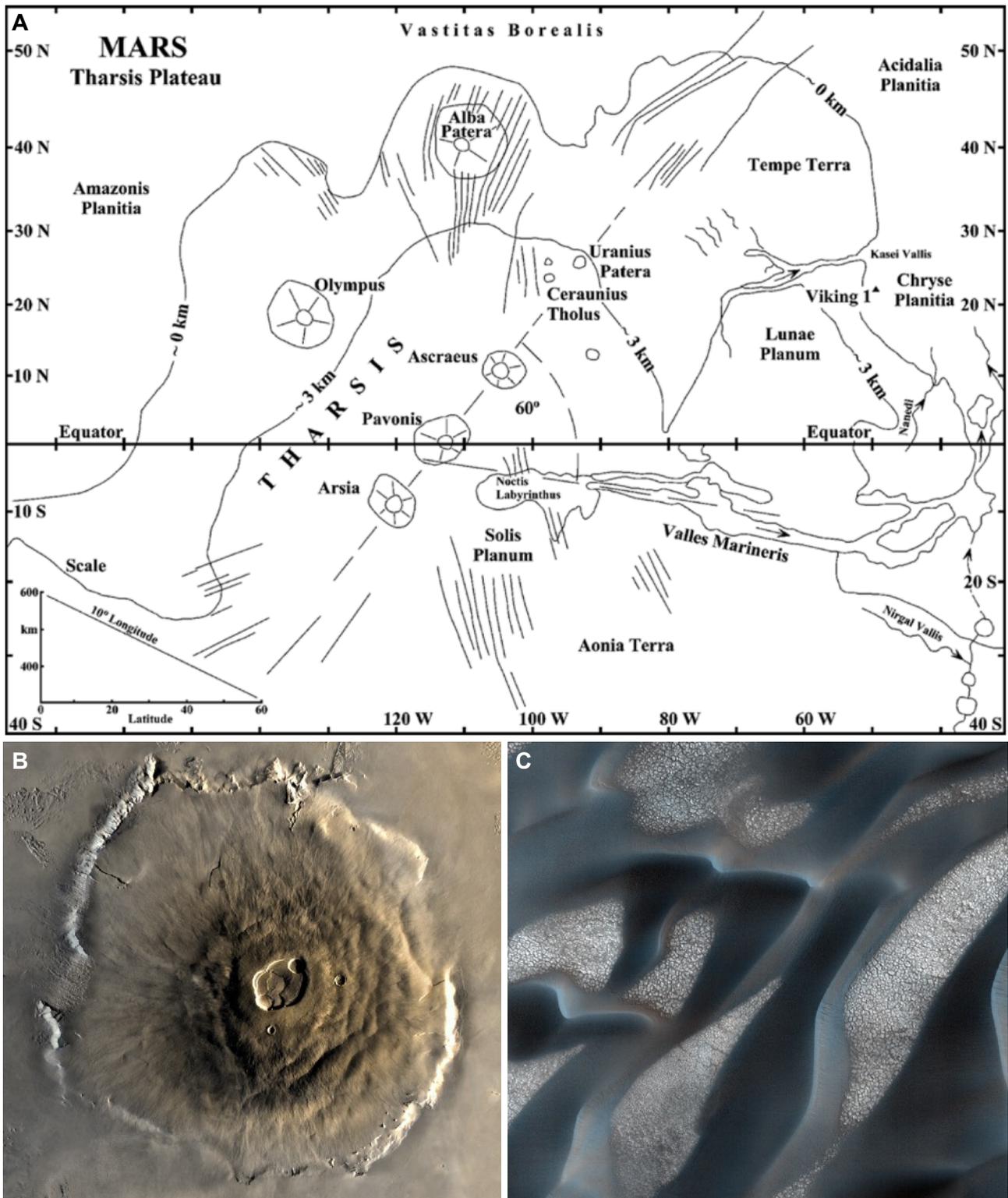


Figura 21 - A) Ilustração das principais feições topográficas do platô *Tharsis*. Fonte: Faure & Mensing (2007, adaptado de “*An Explorer’s Guide to Mars*” publicado pela Planetary Society) B) Imagem do vulcão *Olympus Mons*, o maior vulcão do Sistema Solar. Seu cume tem elevação de 21287m e sua base ocupa área de aproximadamente 300000km². A ausência de crateras de impacto no edifício vulcânico indica ocorrência de derrames recente, provavelmente nos últimos 10 mil anos (Faure & Mensing 2007). Fonte: <https://goo.gl/oWTqzv>. C) Dunas ricas em gesso na *Olympia Undae*. Modificado de: goo.gl/i3Fkjb.

Os pólos marcianos são cobertos por platôs elevados alguns quilômetros acima dos terrenos circundantes. O platô do pólo norte, denominado de *Planum Boreum*, tem cerca de 1000km de diâmetro e é parcialmente cercado por campos de dunas, incluindo o *Olympia Undae* (Fig. 21c). É coberto pela maior geleira do planeta, composta por água e dióxido de carbono em estado sólido (Fig. 22). O platô do pólo sul, denominado de *Planum Australe*, está dentro das *highlands* do sul, posicionado entre 1000 e 1500km acima do terreno circundante. Ele tem forma aproximadamente elíptica, com eixos de diâmetros de aproximadamente 1100 e 1400km. Ambos os platôs são cortados por estruturas espiraladas (Fig. 22), que expõe as camadas de rocha do substrato (Tanaka *et al.* 2014, Faure & Mensing 2007).

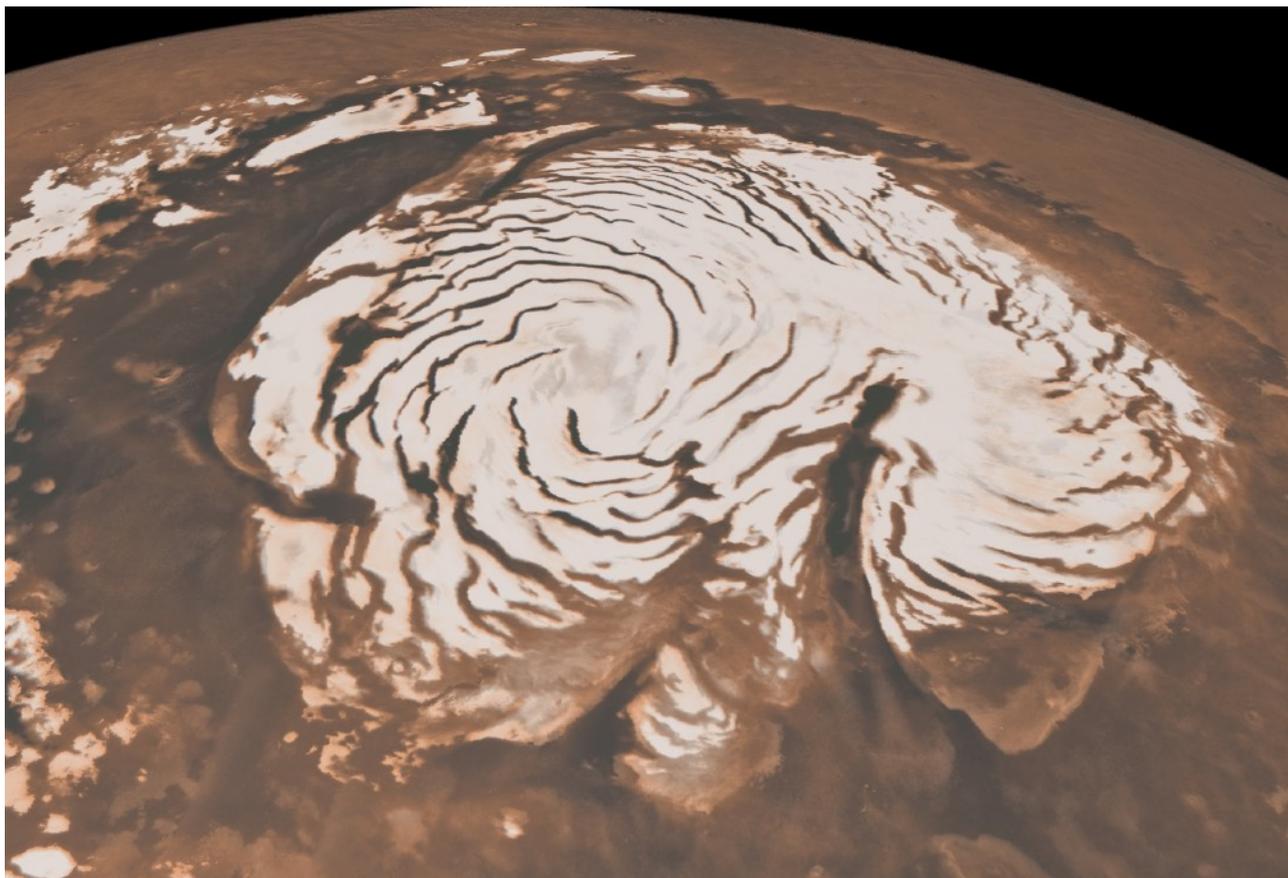


Figura 22 - Imagem da calota polar no pólo norte de Marte, obtida pelo *Mars Global Surveyor*. Notar as feições espiraladas expondo as rochas abaixo do gelo. Fonte: goo.gl/KW6Vw6.

7.4 A história geológica de Marte

A história geológica de Marte pode ser dividida em três éons principais²⁰, brevemente descritos a seguir (Tanaka 1986, Hartmann 2003; *apud* Faure & Mensing 2007). Essa divisão se baseia na contagem de crateras por unidade de área e na datação de número restrito de amostras de meteoritos marcianos coletados na Terra, portanto sendo pouquíssimo precisa (Faure & Mensing 2007).

- Éon Noachiano (4.6-3.5 Ga): O período é caracterizado por bombardeamento constante, formação de diversas crateras de impacto e intensa atividade vulcânica em escala global. Água líquida erodiu depósitos de materiais ejetados pelas colisões sobretudo em bacias

²⁰Para uma síntese da história geológica de Marte, ver Tanaka *et al.* (2014), pg. 9-15.

sedimentares no hemisfério norte do planeta. A atmosfera era mais densa e o efeito estufa era mais intenso em relação aos dias de hoje.

- Éon Hesperiano (3.5-2.5 Ga): A atividade vulcânica tornou-se localizada em alguns centros, gerando volumes progressivamente menores de lava. O transporte de sedimentos por água foi desencadeado a partir do descongelamento de gelo decorrente de atividade vulcânica, impactos de meteoritos e falhamentos crustais. Gases atmosféricos começaram a ser perdidos, resultando na queda das temperaturas globais e na formação de coberturas de gelo nos pólos e em regiões de alta altitude.
- Éon Noachiano (2.5-0 Ga): A atividade vulcânica limitou-se a episódios raros e muito localizados e o clima permaneceu frio e seco. Água líquida tornou-se instável (devido as baixas temperaturas e baixa pressão atmosférica), restando apenas água sob a forma de gelo em *permafrost* abaixo da superfície marciana e nos pólos, junto a gelo de dióxido de carbono. Processos de transporte e deposição de areia e silte por ação de ventos, sobretudo associados a tempestades de poeira, tornaram-se os principais processos sedimentares atuantes em superfície.

7.5 Água e a possibilidades da vida fora da Terra

A presença de diversas feições indicativas de processos de transporte por água em Marte (e.g. Fig.19) tornam clara a existência de água líquida no passado geológico, possivelmente entre os Éons Noachiano e Hesperiano (Faure & Mensing 2007). Contudo, a evolução do planeta levou a perda de grande parte dessa água, resultando em um ambiente desértico seco, dominado por tempestades de poeira.

Até pouco tempo atrás, acreditava-se que água estava presente sob a forma de gelo em camadas de *permafrost* no subsolo marciano, em geleiras nos pólos e em regiões de alta altitude, uma vez que as condições superficiais de pressão e temperatura tornam impossível a existência de água pura em estado líquido (Fig. 23a) (Faure & Mensing 2007). Estudos recentes (Massé *et al.* 2016) comprovaram a existência de água líquida integrando soluções super-salinas (*brines*) metaestáveis (mais detalhes na seção 7.8 EC 4 - Transporte induzido por fluidos meta-estáveis na superfície de Marte), o que levou a significativas mudanças de paradigma acerca do planeta vermelho.

Além da existência de água líquida no passado, outros fatores tidos como essenciais para o surgimento da vida (Jakosky & Shock 1998, Horneck & Baumstark-Khan 2002; *apud* Faure & Mensing 2007) são encontrados em Marte, como tempo para o desenvolvimento de formas de vida primitiva, fonte de energia e presença de nutrientes no ambiente (como compostos orgânicos básicos). Considerando que tais condições existiam na Terra há mais de 3.5 Ga, e que as condições em Marte na época aparentam ter sido muito similares, existem grandes chances de Marte ter abrigado vida no passado (Faure & Mensing 2007). Alguns estudos já abordaram as possíveis evidências físicas da existência de vida no planeta, como a possível ocorrência de microbialitos (Noffke 2015; ver seção 7.7 EC 3 - Semelhanças entre estruturas sedimentares marcianas e microbialitos terrestres) ou de microestruturas orgânicas em meteoritos marcianos como o ALH84001,0 (Fig. 23b) (Is it okay to touch Mars? 2016, Faure & Mensing 2007). As

conclusões obtidas por esses estudos, porém, não passam de especulações científicas. Mesmo assim, a recém-descoberta existência de água líquida em superfície trás nova vida a hipótese, dando base para novas especulações a respeito da existência de formas de vida em outros planetas.

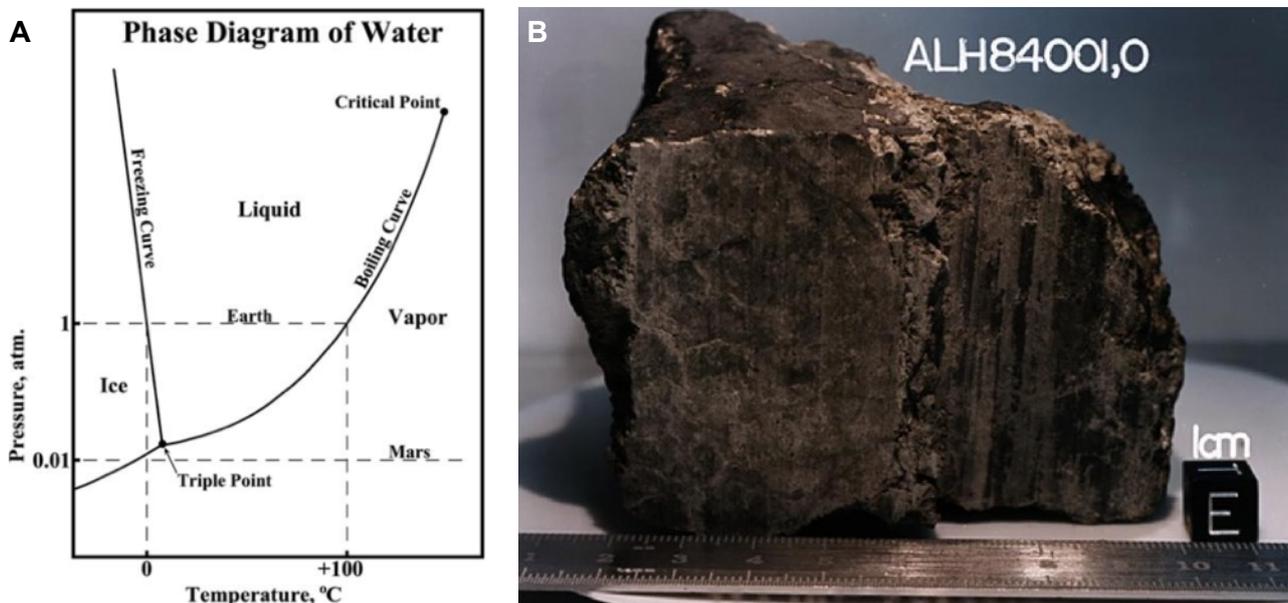


Figura 23 - A) Diagrama de estabilidade de fases da água, com as condições superficiais da Terra e de Marte demarcadas. Fonte: Faure & Mensing (2007). B) Foto do meteorito ALH84001,0, coletado no campo de gelo *Alan Hills*, na Antártica. Os compostos orgânicos encontrados na amostra foram inicialmente interpretados como de origem orgânica. Resultados posteriores corroboraram a origem inorgânica dos compostos. Fonte: goo.gl/7NjlJW.

7.7 EC 3 - Semelhanças entre estruturas sedimentares marcianas e microbialitos terrestres

Noffke (2015), através da comparação de imagens obtidas pela sonda *Curiosity* com imagens de ambientes da Terra, levantou a possibilidade de existência de microbialitos na superfície de Marte e, conseqüentemente, de vida ao menos em seu passado geológico.

Microbialitos são estruturas organossedimentares formadas por comunidades microbianas a partir do trapeamento de sedimentos ou precipitação de minerais (Myers 20??). Segundo Noffke (2015), microbialitos gerados por filmes microbiais dominados por cianobactérias filamentosas em sedimentos de playa tem características específicas e são conhecidos como *microbially induced sedimentary structures* (MISS). Esse tipo de depósito foi de fundamental importância ao longo da história da Terra, representando alguns dos principais registros de formas de vida primitivas que viveram em ambientes semi-áridos, sendo encontrados até os dias de hoje. Estudos recentes revelaram que esse tipo de estrutura manteve sua morfologia e diversidade ao longo da história da Terra (Noffke & Awramik 2013, *apud* Noffke 2015).

Fotografias de rochas do Membro Gillespike Lake (MGL) em Marte, com idades estimadas para cerca de 3.7 Ga, revelaram similaridades a afloramentos de MISS na Terra de idades similares. O MGL é composto por uma sequência de camadas de arenitos estratificados formados em ambiente fluvio-lacustre em clima semi-árido, com velocidades de fluxo compatíveis com a formação de mantos microbiais (Noffke 2000, Noffke *et al.* 2002, Noffke 2010; *apud* Noffke 2015). Diversas estruturas não-usuais foram encontradas nas fotografias e classificadas como possíveis MISS devido a grande similaridade das fotos a exemplos encontrados na Terra.

A classificação das estruturas foi baseada na análise de fotografias tipo *Mastcam* não processadas. As imagens utilizadas foram coletadas pela câmera *Matscam 100* da sonda *Curiosity* nos sols 126 e 306, disponibilizadas para livre acesso pela NASA (goo.gl/zXNx3i). Algumas das imagens finais usadas no trabalho mostram campos completos de visão capturados pela câmera; outras consistem em porções recortadas e ampliadas de fotografias maiores. Comparações com exemplos terráqueos foram feitas por meio de mosaicos fotográficos, com fotografias de Marte e da Terra lado a lado (e.g. Fig. 25). Em todos os casos, as principais estruturas retratadas são ilustradas em croquis, em alguns casos sobrepostos as imagens afim de evidenciar as feições interpretadas. As figuras 24 e 25 trazem exemplos de algumas das interpretações feitas pela autora.

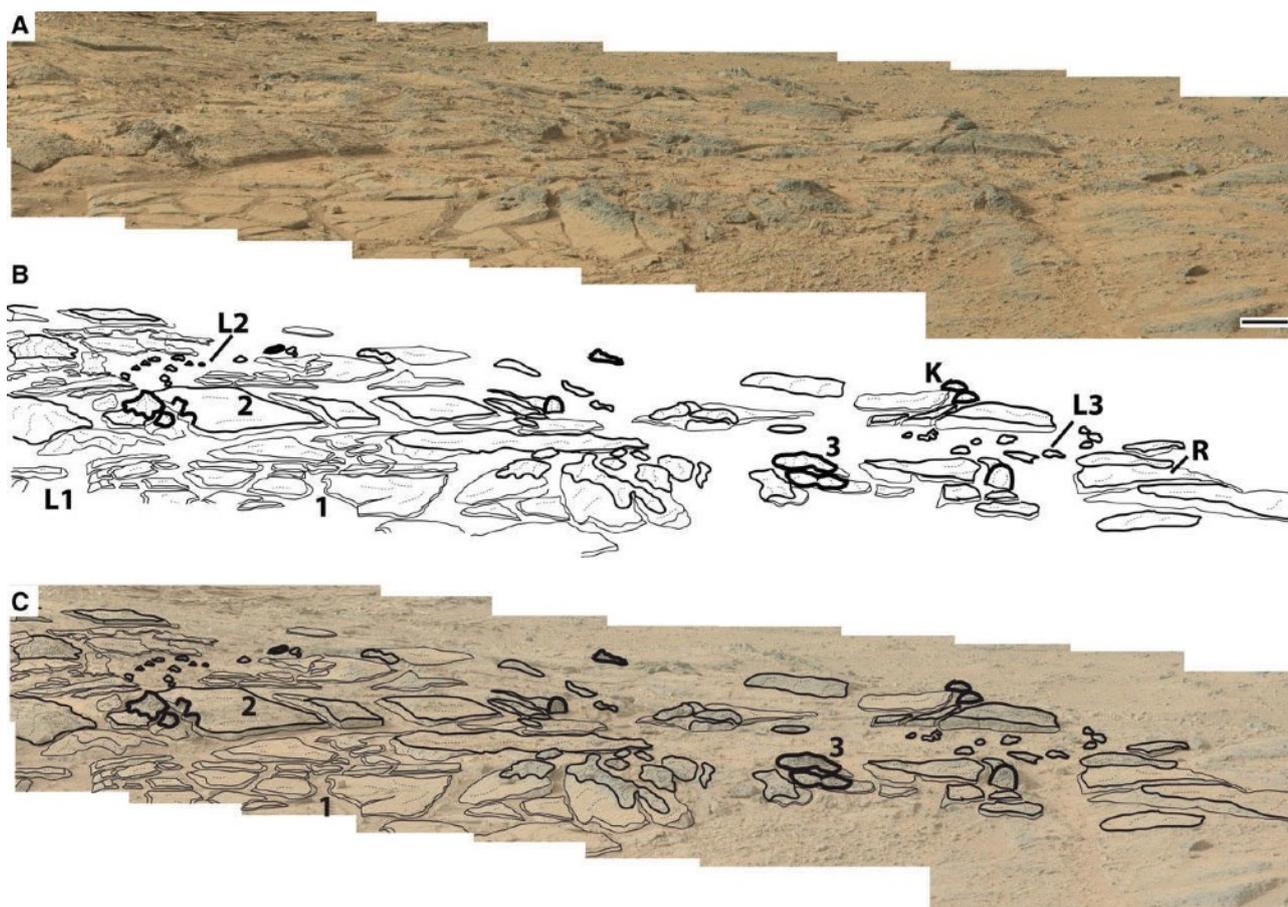


Figura. 24 - Exemplo de interpretação contida no estudo: A) fotomosaico (composto pelas imagens 0306ML0012670000106580E01_DXXX a 0306ML0012670170106597E01_DXXX, e 0306MR001267000020-3930E01_DXXX a 0306MR00126701-70203947E01_DXXX) de afloramento de rochas do MGL; B) croqui das principais estruturas interpretadas pelo autor; e C) sobreposição das duas imagens. Fonte: Noffke (2015).

Interpretações detalhadas das feições visíveis são apresentadas, usadas tanto na classificação precisa dos tipos de MISS possivelmente presentes nas fotografias como no estabelecimento de relações texturais entre as estruturas e sua evolução ao longo do tempo. Noffke (2015) chega a propor sequências de formação das MISS para cada uma das localidades estudadas e possíveis evoluções paleoambientais que resultariam nas sequências referidas.

Embora as feições marcianas sejam muito semelhantes aos MISS da Terra, a autora conclui que não é possível ter certeza quanto a presença de vida em Marte, definindo suas conclusões como “puramente especulativas” e elencando a possibilidade de formação das

estruturas interpretadas por processos abióticos. Todavia, ressalta que, na Terra, filmes bacterianos formam-se sobre a grande maioria das superfícies expostas periodicamente a água, sendo capazes de colonizar grande diversidade de ambientes. Segundo a autora, quando condições hidrodinamicamente favoráveis estão presentes, esses filmes conseguem evoluir para espessos mantos microbiais, independentemente do substrato rochoso sobre o qual se formaram. Isso permite concluir, com segurança, que o substrato marciano seria adequado a formação de tais feições, desde que microorganismos estivessem presentes.

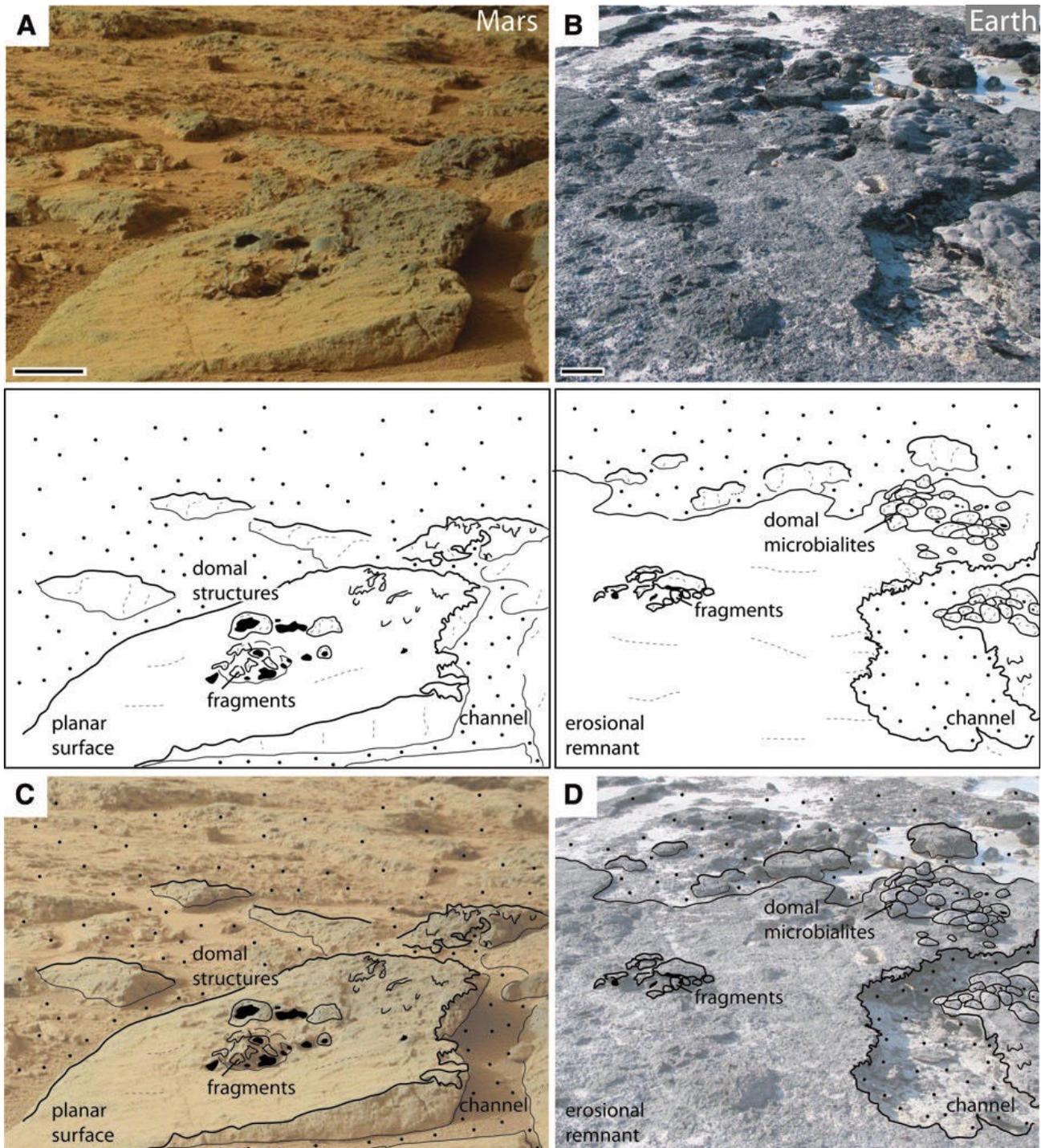


Figura 25 - Exemplo de estudo comparativo de A) de rochas do MGL em Marte (imagen 0306MR0012670140203944E01_DXXX) em comparação a B) exemplos terrestres de MISS no *Carbla Point*, no oeste da Austrália. Assim como na Fig. 24, são apresentados croquis ressaltando as principais estruturas interpretadas pelo autor (C, D) e sobreposições dos croquis e fotografias originais (E, F). Fonte: Noffke (2015).

Noffke (2015) ainda propõe uma estratégia para a futura identificação segura de possíveis MISS em missões futuras ao planeta vermelho. Segundo a autora, a estratégia deve ser dividida em quatro etapas: detecção, identificação, confirmação e diferenciação. A detecção inclui a procura por depósitos de ambientes aquáticos onde condições para a formação e preservação de MISS. Os instrumentos da sonda *Curiosity*, como o próprio *Mastcam*, podem ser usados para essa finalidade, sobretudo se utilizados para a coleta sistemática de imagens de afloramentos. A identificação consiste na comparação de feições identificadas como possíveis MISS a exemplos terráqueos, de modo similar ao estudo apresentado. O *Mastcam* da sonda *Curiosity* também pode ser usado para essa finalidade, especialmente se imagens em condições de iluminação e ângulos distintos forem coletadas, de modo a permitir comparações mais minuciosas. A confirmação consiste na procura por microestruturas em feições promissoras (como as apresentadas no estudo). Idealmente devem ser usadas seções delgadas e análises laboratoriais diversas, como estudos geoquímicos e mineralógicos. Alguns dos instrumentos da sonda *Curiosity* podem ser usados nessa fase, tal como o espectrômetro de raio-x de partículas alfa (*Alpha Particle X-ray Spectrometer - APXS*), o *ChemCam* e o *CheMin (Chemistry and Mineralogy X-ray diffraction and X-ray fluorescence)*, embora a análise de amostras em laboratório também seja recomendada. A fase final, de diferenciação, exige comparação das possíveis estruturas microbiais a equivalentes abióticos morfológicamente semelhantes. Isso, por sua vez, exige compreensão detalhada dos processos sedimentares atuantes em Marte, o que torna essa fase de investigação executável apenas no futuro.

7.8 EC 4 - Transporte induzido por fluidos meta-estáveis na superfície de Marte

Segundo Massé *et al.* (2016), existe a possibilidade de existência de água líquida em Marte atualmente, embora apenas por períodos curtos e em estado metaestável. Sua identificação, porém, é dificultada pela compreensão limitada da interação entre fluidos metaestáveis e sedimentos de modo geral. Experimentos feitos pelos autores demonstraram que a água evapora conforme percola na superfície marciana, resultando em mecanismos de fluxo híbridos envolvendo processos secos e úmidos. Soluções salinas (*brines*) metaestáveis movidas por esses mecanismos formam feições suficientemente próximas às observadas em Marte, sendo possíveis candidatos para explicar as feições morfológicas observadas, anteriormente atribuídas a processos puramente secos ou puramente úmidos.

De acordo com os autores, a determinação da presença de água líquida é de grande importância para a compreensão do ciclo hidrológico marciano e, conseqüentemente, para compreender as possibilidades de se encontrar vida e de se estabelecer colônias no planeta no futuro. Embora as condições de pressão e temperatura na superfície de Marte impossibilitem a existência de água líquida (ver seção 7.5 *Água e as possibilidades da vida fora da Terra*), estudos termodinâmicos (Hecht 2002, Grimm *et al.* 2014; *apud* Massé *et al.* 2016) apontam ser possível a existência de fases líquidas metaestáveis por períodos limitados de tempo, sobretudo se considerados os efeitos de sais diluídos na temperatura de fusão e taxa de evaporação dos fluidos (Brass 1980, Chevrier & Rivera-Valentin 2012; *apud* Massé *et al.* 2016).

Os pesquisadores elaboraram uma série simulações laboratoriais objetivando compreender os mecanismos de fluxo atuantes em Marte e os efeitos das condições superficiais de pressão e temperatura no transporte de sedimentos (Fig. 26). As fontes mais prováveis de água são o derretimento sazonal de gelo (tanto superficial como presente no solo) e a deliquescência²¹, processos esses incapazes de gerar grandes quantidades de água líquida (Chevrier & Rivera-Valentin 2012, McEwen *et al.* 2014, Stillman *et al.* 2014, Gough *et al.* 2011, Kereszturi *et al.* 2009; *apud* Massé *et al.* 2016). As simulações foram realizadas por meio do derretimento de blocos de gelo colocados sobre declives cobertos por sedimentos arenosos finos, resultando em taxas de propagação de líquidos similares a valores calculados para Marte (Kereszturi *et al.* 2009; *apud* Massé *et al.* 2016). Simulações foram feitas usando blocos feitos de água pura e de solução salina eutética de MgSO₄, em condições análogas a Terra e a Marte.

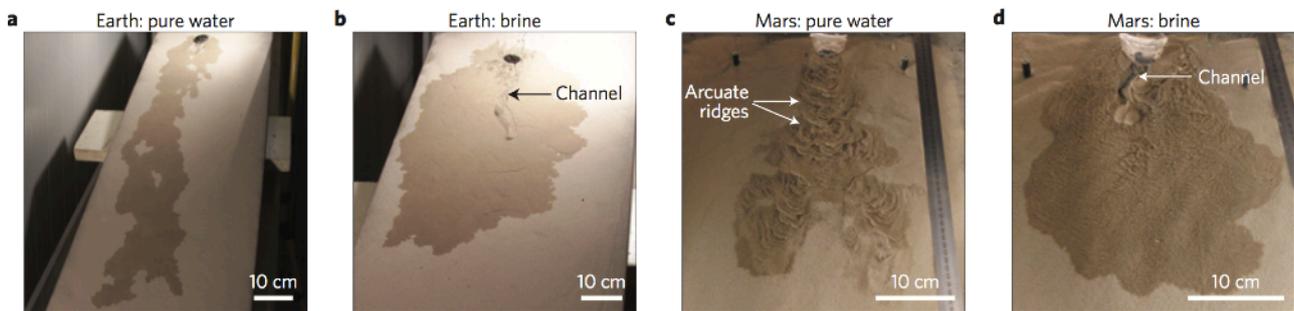


Figura 26 - Resultados obtidos por alguns dos experimentos. As fotos mostram as morfologias de fluxos obtidas a partir do derretimento de blocos de gelo sobre 1-2mm de areia. As condições experimentais são: a) água congelada e b) solução salina congelada a 1 bar e 293K; e c) água congelada e d) solução salina congelada a 9mbar e 293K. Fonte: Massé *et al.* (2016).

Massé *et al.* (2016) observaram que, em ambos os casos, formam-se feições lineares escurecidas (devido a saturação dos sedimentos por líquidos), orientadas de acordo com o declive (Fig. 26). O transporte se dá, de modo geral por fluxo intergranular ou por percolação, com raras ocorrências de formação de acumulações superficiais de líquidos. Além disso, foi observado que, devido a maior densidade, as soluções salinas tendem a formar feições mais curtas e largas e apresentam maior capacidade de transporte sedimentar (Fig. 27a).

Os autores concluíram que, em condições ambientais marcianas, o derretimento de gelo gera um líquido metaestável que evapora rapidamente através de ebulição, resultando na perda de água e, conseqüentemente, em feições comparativamente menores as produzidas em condições superficiais terrestres. Também foi notado que, em condições marcianas, a percolação finaliza imediatamente após o fim do derretimento do bloco de gelo, enquanto que na Terra a percolação continua (Fig. 27a).

A principal diferença entre as condições terrestre e marciana notada foi a significância do processo de ebulição no transporte sedimentar, sendo de grande significância para as condições de pressão de Marte. O processo tem mais vigor na interface entre a zona saturada e a atmosfera, onde o gradiente térmico é o mais elevado. Ele resulta na saltação de grãos, que são incorporados pelo vapor que escapa do substrato. Os autores estimaram que, para a gravidade de

²¹Do inglês *deliquescence*, que consiste no processo de absorção de uma substância da atmosfera até formar uma solução. No caso, o solo marciano absorve vapor d'água da atmosfera até gerar pequenas acumulações de água líquida.

Marte, grãos de até 4mm podem ser transportados por esse processo. Os grãos arremessados constroem pequenos montes na parte frontal do fluxo, que colapsam por meio de fluxos granulares secos de tempos em tempos.

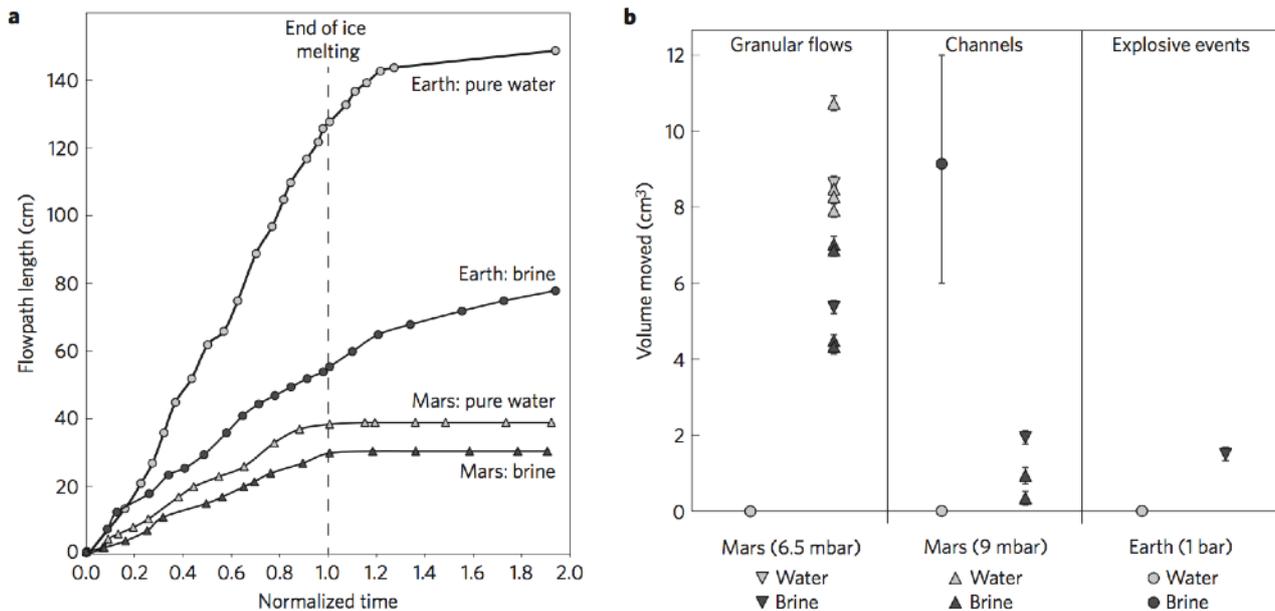


Figura 27 - a) Evolução das dimensões das feições geradas pelo fluxo com o tempo para os experimentos retratados na Fig. 26 (tempo normalizado pela duração total do derretimento do gelo). b) Volume de sedimentos movidos pelos experimentos, para diferentes condições ambientais. Fonte: Massé *et al.* (2016).

De acordo com o modelo proposto (Fig. 28), a progressão do fluxo, em condições superficiais marcianas, se dá a partir da repetição de fases sucessivas de percolação e fluxos granulares secos, gerando uma série de charneiras ao longo do caminho de propagação. As feições resultantes são em grande parte controladas pela natureza do fluido associado (água ou solução salina) (Fig. 26).

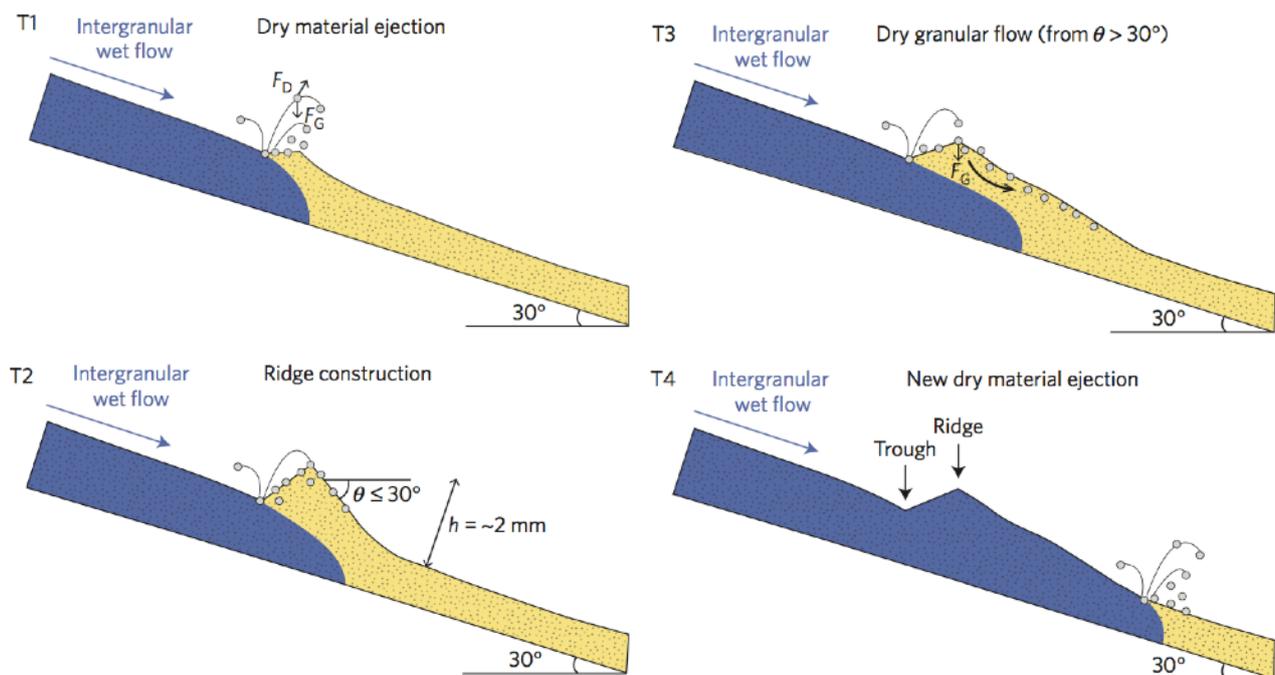


Figura 28 - Seção geológica interpretativa detalhando os mecanismos de propagação de água líquida em condições atmosféricas marcianas. As porções azuis correspondem a zona saturada, onde há percolação de água; as zonas amarelas correspondem a porções de areia seca. Fonte: Massé *et al.* (2016).

Três conclusões foram alcançadas pelos autores. Em primeiro lugar, os experimentos clarificaram a ausência de detecção espectrométrica reportada em estudos anteriores (Ojha 2015, Chevrier *et al.* 2009, *apud* Massé *et al.* 2016). Ela se deve ao fato da propagação do líquido se dar sobretudo através de percolação intergranular, sem a formação de depósitos superficiais de água por períodos significativos de tempo, o que resulta em respostas espectrométricas inferiores aos limites de detecção dos instrumentos; apenas assinaturas provindas de sais depositados ao longo de canais e do escurecimento ocasionado pela percolação dos fluídos podem ser medidas. Em segundo lugar, as morfologias resultantes dos experimentos mostraram que pequenas quantidades de água, devido a seu estado metaestável, podem gerar impactos geomorfológicos desproporcionais (Fig. 27b). Por fim, concluíram que existem diferenças fundamentais na forma como líquidos estáveis e metaestáveis se propagam por sedimentos, o que demonstra que interpretações acerca de processos sedimentares atuantes em Marte hoje em dia não podem ser feitas com base unicamente em processos observados na Terra.

8 O Sistema Plutão-Caronte

Plutão é o mais proeminente planeta anão do cinturão Edgeworth-Kuiper, popularmente conhecido como cinturão de Kuiper. Ele apresenta grande similaridades a outros corpos compostos majoritariamente por gelo, como algumas luas de Júpiter e Saturno (*e.g.* Calisto, Titan, Oberon etc.). Possui cinco luas, uma grande chamada de Caronte, e quatro pequenas chamadas de Nix, Hydra, Kerberos e Styx (Faure & Mensing 2007, NASA).

Plutão foi descoberto por Clyde Tombaugh em fotografias tiradas no Observatório Lowell em 1930. Sua descoberta encerrou uma série de investigações dos limites do Sistema Solar feitas para explicar as irregularidades da órbita de Urano em relação as previsões matemáticas da época. Caronte foi descoberta 48 anos depois por James Christy, que notou manchas encontradas em diversas fotografias de Plutão tiradas no Observatório Naval dos Estados Unidos e as interpretou como uma lua. Ironicamente, foi descoberto que mesmo a massa combinada de Plutão e Caronte é insuficiente para explicar as irregularidades da órbita de Netuno, o que implica que a descoberta de ambos os astros foi acidental. Essa ironia só foi aprofundada quando estimativas mais precisas das massas de Urano e Netuno foram usadas para o estudo da órbita dos astros, resultando no desaparecimento das irregularidades percebidas anteriormente (Faure & Mensing 2007).

Os astros referidos foram visitados pela primeira vez pela sonda *New Horizons*, que completou uma aproximação ao sistema (*close approach*) no dia 14 de Julho de 2015, após quase 10 anos de viagem (ela foi lançada em 19 de Janeiro de 2006) (Stern *et al.* 2015). A sonda captou as primeiras imagens de alta resolução do sistema (Fig. 29) e coletou diversos dados, revelando uma complexidade geológica inesperada. Os dados coletados permitiram a elaboração dos primeiros mapas para os dois astros (Fig. 30).

8.1 Propriedades físicas de Plutão e Caronte

As principais características físicas e orbitais de Plutão e Caronte estão resumidas na Tabela 10. Caronte é particularmente grande quando comparada a Plutão, com raio equivalente a

cerca de 51.7% do raio e aproximadamente 13.7% da massa de Plutão. Os dois astros apresentam densidades semelhantes, e muito próximas as estimadas para para algumas luas de gelo do Sistema Solar (e.g. Titan e Triton) (Faure & Mensing 2007). A diferença inferior a 10% entre as respectivas densidades permite inferir que os dois astros foram originados de precursores indiferenciados (ou modestamente diferenciados) no momento da colisão formadora do sistema (Stern *et al.* 2015).



Figura 29 - Imagem de Plutão e Caronte, tirada pela sonda espacial *New Horizons*. Plutão é o maior dos dois astros. Fonte: goo.gl/ZTHIOT.

A superfície de Plutão apresenta grande variedade de formas de relevo e de idade, com substanciais variações de cor e composição. Os dados coletados indicam que a crosta do planeta anão é rica em gelo de água, incluindo superfícies geologicamente recentes, feições indicativas de tectônica extensional, possível presença de convecção superficial de camadas de gelo volátil, possível ação de ventos, transporte de voláteis em superfície e feições de movimentação glacial (Stern *et al.* 2015).

Tabela 10 - Principais propriedades físicas de Plutão e Caronte

propriedade física	Plutão	Caronte
raio (km)	1150	595
massa (kg)	$1,29 \times 10^{22}$	$1,77 \times 10^{21}$
densidade média (g/cm ³)	2030	~2000
velocidade de escape (km/s)	1.10	~0,590
superfície	CH ₄ , gelo (H ₂ O), N ₂	gelo (H ₂ O)
atmosfera	CH ₄ difuso	não tem
propriedade orbital		
semi-eixo maior	39.53 UA	19.6×10^3 km
período de revolução	247.7y	6.39d
período de rotação (dias)	6.39	6.39
inclinação em relação a eclíptica (°)	17.15	-
inclinação em relação ao equador (°)	-	98.8
excentricidade da órbita	0.248	-
obliquidade (°)	122	0

modificado de: Faure & Mensing (2007)

Plutão é dotado de atmosfera, com traços de hidrocarbonetos, camada de neblina global e pressões superficiais estimadas de aproximadamente 10 microbars (mais detalhes na seção 8.3 UC 5 - A atmosfera de Plutão conforme observada pela sonda New Horizons). Estima-se que a atmosfera do planeta anão seja composta por N₂, CH₄, C₂H₂ e C₂H₄, dentre outros gases. Caronte, por sua vez, apresenta feições indicativas de tectônica extensional, bem como evidências de variação composicional crustal (sobretudo ligadas a variações de cor) e de extensivo resurfacing (*resurfacing*) (Stern *et al.* 2015).

8.2 Características das órbitas de Plutão e Caronte

A órbita de Plutão tem raio médio de 39.53 UA. O astro se move ao redor do Sol no sentido progradacional, levando cerca de 247.7 anos para completar uma revolução completa. O plano orbital é o mais inclinado dos corpos principais do Sistema Solar, fazendo 17.15° em relação a eclíptica (Faure & Mensing 2007).

Embora o raio médio de sua órbita indique que Plutão está mais afastado do Sol que Netuno, por cerca de 20 anos por revolução o planeta anão encontra-se mais próximo do Sol do que Netuno. Isso se deve ao formato peculiar de sua órbita, ilustrado na Fig. 31. A colisão entre os astros só é evitada devido a alta inclinação do plano orbital de Plutão (Faure & Mensing 2007).

A interação entre Plutão e Caronte também se mostra peculiar. A distribuição de massa grosseiramente homogênea entre os dois astros (ao menos em relação aos planetas do Sistema Solar e suas respectivas luas) faz com que Plutão e Caronte orbitem um centro de massa comum situado no espaço entre os dois corpos planetários, a ~2369km do centro de Plutão. Além disso, Caronte está em acoplamento de rotação-revolução 1:1, com período de 6.9 dias terrestres. Além

disso, Plutão leva 6.9 dias terrestres para completar uma volta ao redor de seu eixo. Disso resulta que os dois astros do sistema orbitam um centro comum de massa, sempre apontando a mesma face um para o outro (Faure & Mensing 2007).

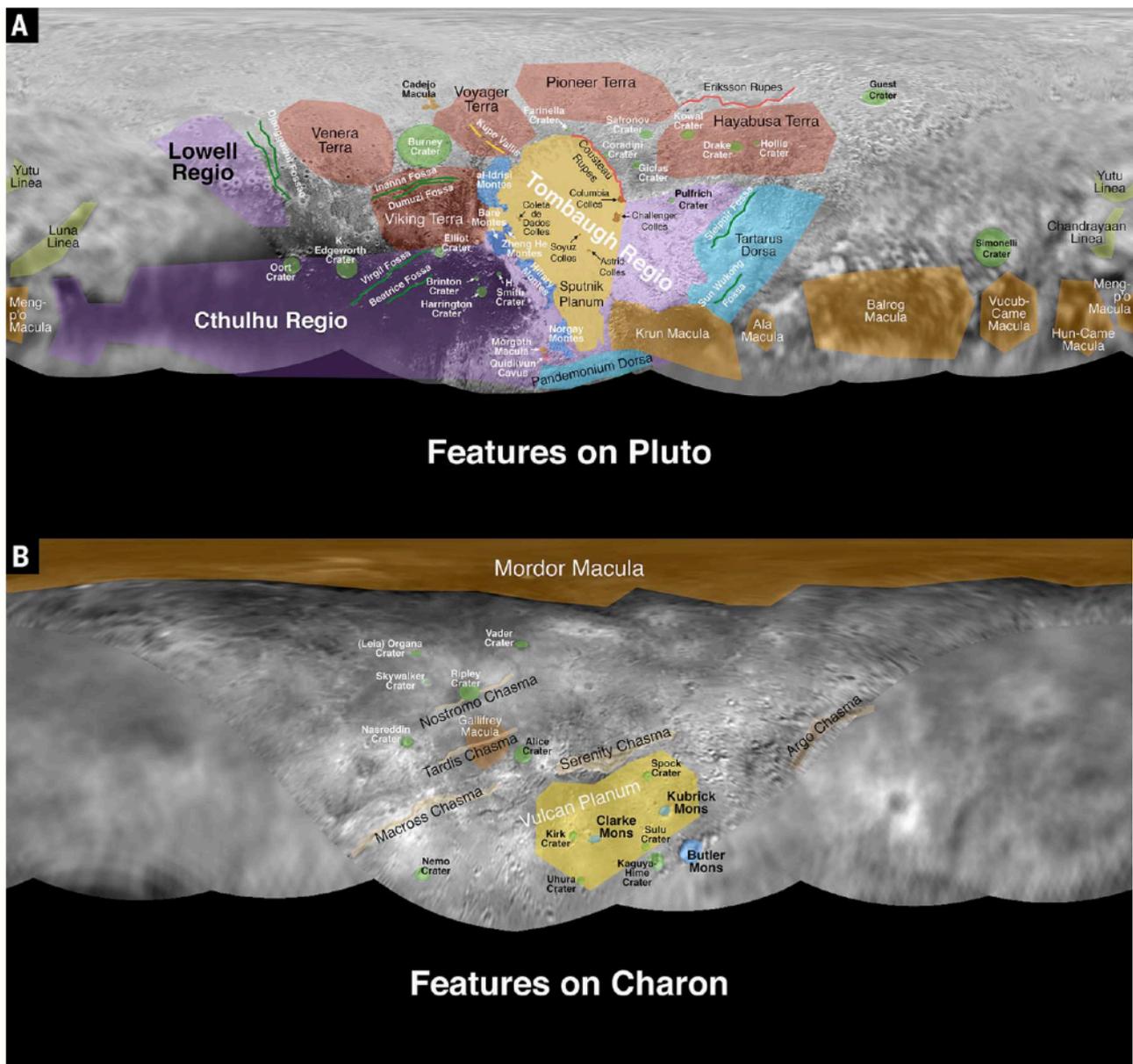


Figura 30 - Mapa com divisão informal dos compartimentos geomorfológicos de Plutão e Caronte. Em vermelho, *terrae*; em verde, crateras; em amarelo claro, *chasmata*; em laranja, *macula*; em azul, *montes*; em roxo, *regios*; em amarelo, *plana*; em ciano, *dorsae*; em rosa, *cavi*; em verde claro, *lineae*; em amarelo dourado, *colles*; em linhas vermelhas, *rupes*; em linhas verdes, *fossae*; e em linhas amarelas, *valles*. Fonte: Stern *et al.* (2015).

8.3 EC 5 - A atmosfera de Plutão conforme observada pela sonda *New Horizons*

Segundo Gladstone *et al.* (2016), medições feitas pela sonda *New Horizons* revolucionaram a compreensão da atmosfera de Plutão. Diversas características inesperadas foram reveladas, tal como a atmosfera superior fria e as várias camadas de névoa que cobrem o planeta. A baixa temperatura da atmosfera superior implica taxas de escape atmosférico muito menores do que as previstas por modelos anteriores, o que tem implicação direta para a evolução do planeta anão, sobretudo em relação ao ciclo de reciclagem de voláteis atuante na superfície do

notar porções onde a inversão térmica referida cessa abruptamente, o que indica a presença de uma camada-limite.

A pressão superficial foi estimada pelos autores em cerca de 11 μbar , compatível com valores obtidos em estudos anteriores (Fig. 32). Para a temperatura, por sua vez, obteve-se valor médio de $45\pm 3\text{K}$, mais alta do que o esperado para as composição superficial dominada por N_2 até então inferida (Fig. 32). Porém, foram obtidos valores de $37\pm 3\text{K}$ para profundidades de até 4km em relação ao raio médio do astro durante a ingressão, compatíveis com as temperaturas esperadas para uma superfície coberta por gelo de nitrogênio. Isso permite inferir variação na composição superficial de Plutão, com diferenças significativas no tamanho das reservas de N_2 ; regiões onde existem reservas maiores apresentariam temperaturas menores em decorrência da sublimação do composto e consequente resfriamento atmosférico, como acredita-se ser o caso da *Sputnik Planum*.

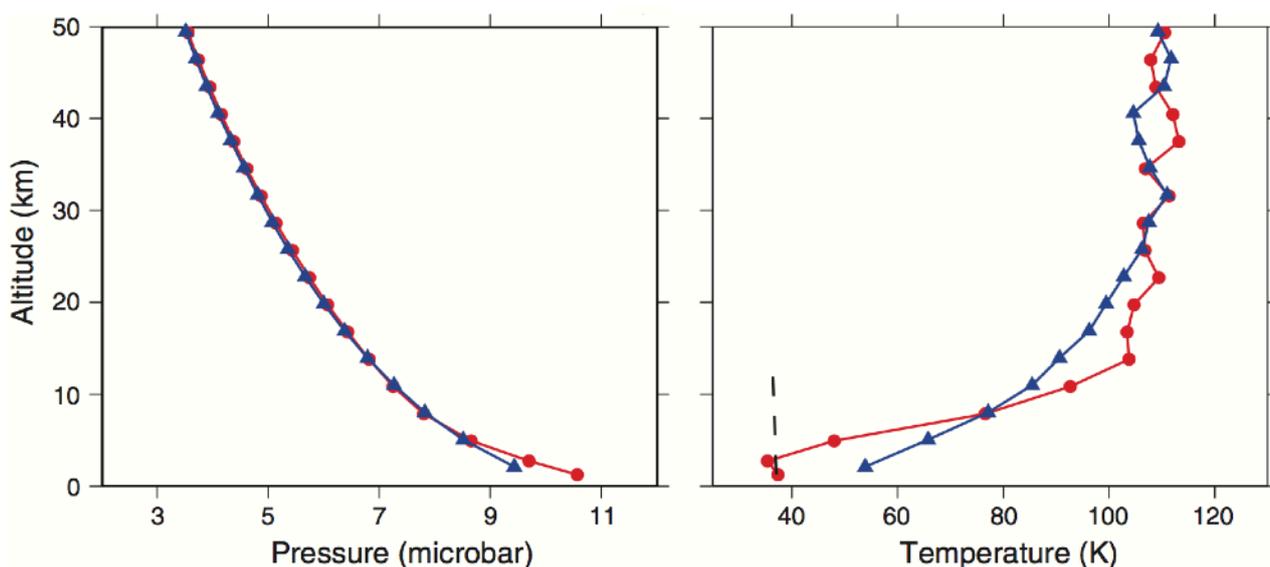


Figura 32 - Gráficos mostrando a variação nos valores de pressão (a esquerda) e temperatura (a direita) na atmosfera de Plutão. As linhas azuis e vermelhas mostram, respectivamente, dados obtidos na entrada e saída da órbita de Plutão, portanto em lados opostos do astro. Fonte: Gladstone *et al.* (2016).

Segundo Gladstone *et al.* (2016), modelos indicam que a fotoquímica nas porções superficiais da atmosfera de Plutão é similar a das luas Titã (Saturno) e Triton (Netuno) (Summers *et al.* 1997, Lara & Rodrigo 1997, Krasnopolsky & Cruikshank 1999, Wong & Yung 2005; *apud* Gladstone *et al.* 2016). De acordo com esses modelos, metano é fotolizado por radiação ultravioleta extrema emitida pelo Sol, e secundariamente por *scattering* interplanetário de fótons *Lyman α* por hidrogênio (*interplanetary hydrogen scattering of solar Lyman α photons*). Nitrino também é produzido a partir da fotolização de N_2 por radiação ultravioleta extrema solar, além de íons grandes em altas altitudes que podem servir de núcleo para formação de névoas.

Análises espectrométricas evidenciaram que a opacidade da atmosfera superior de Plutão é gerada sobretudo pela presença de CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , e névoa, em contraposição as previsões da dominância de N_2 . A presença desses compostos, sobretudo do N_2 , resulta numa temperatura máxima de $\sim 70\text{K}$, embora detalhes do regime térmico atmosférico, sobretudo na porção superior, sejam desconhecidos.

Camadas de névoa opticamente finas foram identificadas a altitudes superiores a 200km, com continuidades laterais no geral superiores a 1000km e espessuras na ordem de 50km (Fig. 33). As camadas são separadas por intervalos de cerca de 10km, e se dividem, se unem, aparecem e desaparecem quando seguidas horizontalmente. Camadas mais proeminentes podem ser encontradas a altitudes de 10, 30, 90 e 190km, e aparentam afinar conforme se reduz a altitude. A razão MVIC azul/vermelho diminui com aumento da altitude, fato consistente com a redução do tamanho das partículas conforme se aumenta a distância até a superfície do astro.

Segundo Gladstone *et al.* (2016), a pressão e composição atmosféricas de Plutão é condicionada por equilíbrio de sublimação com gelos da superfície, sobretudo de N₂ e secundariamente de CH₄ e CO. A sublimação induzida pela incidência de luz solar sobre depósitos desses compostos resulta em transporte de material para regiões mais frias, onde ocorre precipitação. A fraca troca radiativa de temperatura entre a atmosfera e a superfície, conforme medida por dados do REX e em medições feitas da Terra (Olkin *et al.* 2014; *apud* Gladstone *et al.* 2016), suprime a formação de convecção atmosfera e inibe a formação de uma toposfera. A estratificação de névoa, por sua vez, possivelmente é decorrente de ventos soprando sobre a topografia, em um processo denominado de forçamento orográfico (*orographic forcing*); tal hipótese é atestada pela presença de desníveis de até 3km na superfície do corpo (Stern *et al.* 2015, Moore *et al.* 2016).

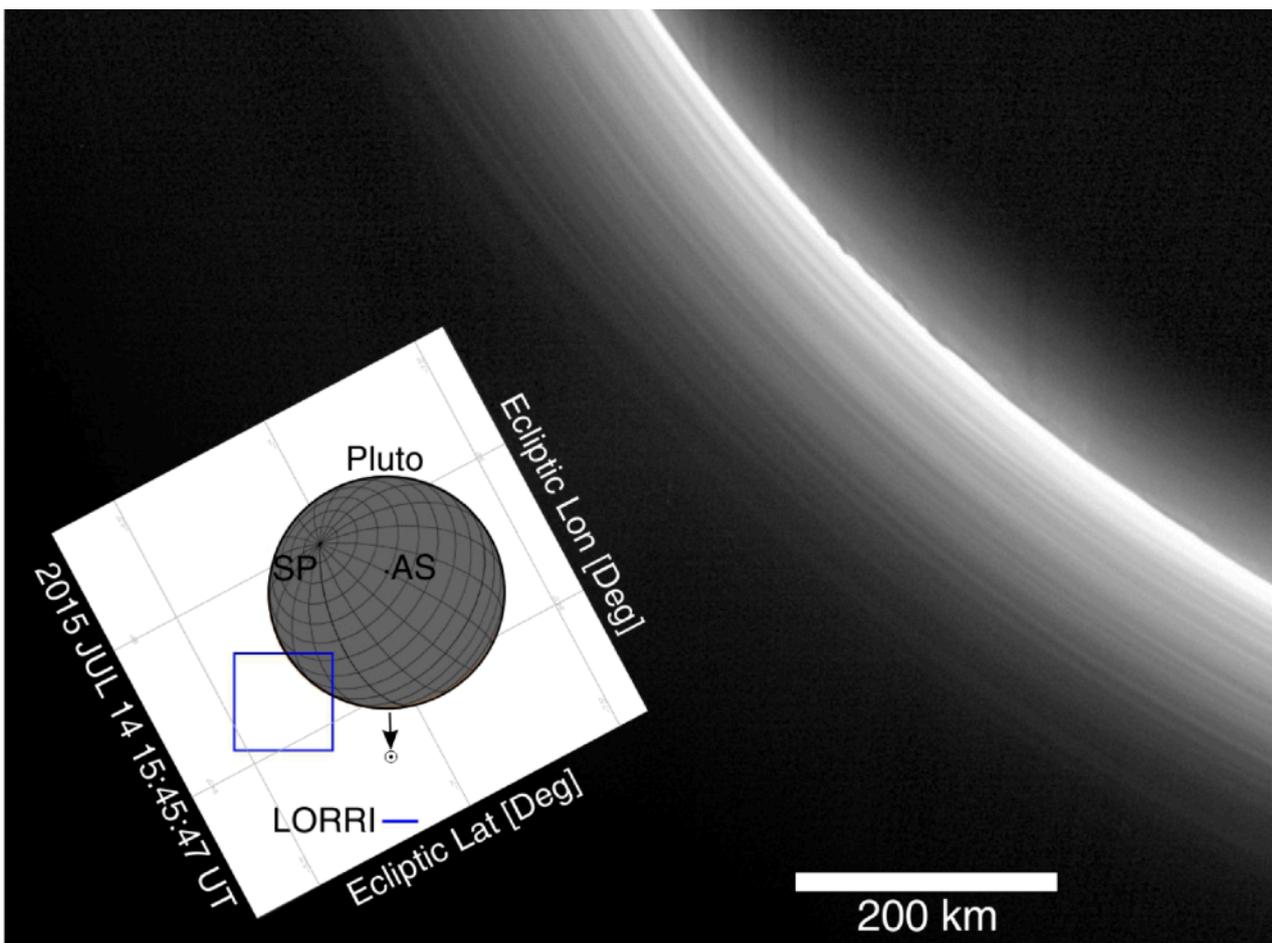


Figura 33 - Imagem das camadas de névoa em Plutão, coletada no dia 14 de Julho de 2015 começando as 15:45:43 UTC (observação 5 de P_MULTI_DEP_LONG_1 a MET 299194661-299194671; 0.3s de exposição total), a cerca de 196586km de Plutão e com ângulo de fase de cerca de 169°. Fonte: Gladstone *et al.* (2016).

O escape de material para o espaço, embora menor do que o esperado de acordo com modelos anteriores, também tem significância para o planeta anão. Segundo os autores, ele é limitado pela incidência de raios ultravioleta extremos e aquecimento por radiação ultravioleta distante ambos causados pelo Sol. A taxa de escape de nitrogênio e metano atual da atmosfera superior de Plutão foi calculada em 1 e 500×10^{23} moléculas por segundo respectivamente. Se as taxas forem constantes ao longo de uma revolução completa ao redor do Sol, são perdidos ~3mm e $1.5\mu\text{m}$ de espessura equivalente²³ de gelo de nitrogênio e de metano na superfície do astro. Embora a taxa de perda de nitrogênio seja compatível com a ausência do composto em Caronte, é incompatível com as feições topográficas de Plutão (mais detalhes na próxima seção), o que leva a crer que, no passado geológico, o material superficial foi perdido mais rapidamente.

8.4 EC 6 - Composição superficial de Plutão e Caronte

Segundo Grundy *et al.* (2016), as feições topográficas presentes na superfície de um planeta são produto dos materiais disponíveis e da ação de uma série de processos condicionados pelas condições físicas e químicas do local, fornecendo pistas observáveis quanto aos processos que atuaram no passado geológico. Logo, sua compreensão é essencial para a reconstrução da história geológica de um corpo planetário. No caso de Plutão, análises feitas com base em dados coletados na Terra indicaram a presença de tipos diversos de gelo, como nitrogênio (N_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), C_2H_6 e água (H_2O), além de depósitos inertes de *tholins*²⁴. Eles podem ser distinguidos uns dos outros por meio das suas linhas de absorção, o que permite mapear depósitos de compostos diferentes com base em suas respostas espectrais. Os autores utilizaram imagens coletadas pela sonda *New Horizons* para mapear a distribuição das principais concentrações de alguns dos principais tipos de gelo presentes na superfície de Plutão e analisar algumas das feições topográficas descobertas. Notaram grande diversidade regional de cores e composições, muito superior a esperada, e feições típicas de escoamento glacial e de regimes atmosféricos dominados por sublimação de gelo. Segundo eles, compostos mais voláteis, como N_2 e CO , movimentam-se dentro de grandes ciclos, resultando na formação de feições mais acidentadas em blocos formados por substâncias mais rígidas, como H_2O . A variação na volatilidade dos vários materiais resultaria na grande diversidade de formas vista atualmente em Plutão.

As observações feitas restringiram-se ao lado da aproximação maior feita pela *New Horizons*, por este ter sido imageado com maior precisão. Foram usadas imagens diversas coletadas pelo instrumento Ralph, que consiste em um telescópio que fornece luz a câmera multi-espectral de imagens visíveis (*Multispectral Visible Imaging Camera - MVIC*) e ao imageador espectral e panorâmico (*Linear Etalon Imaging Spectral Array - LEISA*). Os dados coletados foram usados para mapear a distribuição espacial de depósitos de CH_4 , N_2 , CO e H_2O , e posteriormente comparados a imagens coletadas da Terra e usadas em estudos anteriores para fins de controle.

²³Espessura para o caso de uma cobertura homogênea do material ao redor de Plutão.

²⁴Classe de hetero-polímeros formados a partir da ação de raios ultravioleta sobre compostos orgânicos básicos, como metano ou etano. São comuns em corpos de gelo do Sistema Solar exterior.

CH₄, N₂ e CO são voláteis nas condições superficiais de Plutão, sustentando a atmosfera do planeta anão por meio de pressão de vapor e participando de ciclos sazonais (Stern & Trafton 2009, *apud* Grundy *et al.* 2016; ver também a seção anterior). Deles, o N₂ é o mais volátil, dominando a dinâmica atmosférica baixa, enquanto que o CH₄ é o menos, dominando a dinâmica da atmosfera superior. Além disso, são infinitamente solúveis entre si, estando misturados em proporções diversas em toda a superfície do astro.

Os dados obtidos revelaram uma complexa distribuição dos compostos, embora as imagens geradas permitam apenas comparações qualitativas e não quantitativas (Fig. 34). As bandas de absorção de CH₄ são as dominantes, sendo especialmente fortes na grande região em formato de coração informalmente denominada de *Tombaugh Regio* (TR), na *Tartarus Dorsa*, em porções da *Lowell Regio*, nos arredores da *Cthulhu Regio*, e nos entornos (*rims*) de diversas crateras de impacto. As bandas correspondentes a N₂ concentram-se em altas latitudes e regiões de menores temperaturas de modo geral, como no fundo de diversas crateras e na porção oeste da TR (denominada de *Sputnik Planum* - SP). A maior dificuldade em detectar as bandas referentes a esse composto permitem inferir seu domínio na composição da superfície de Plutão, embora quantificações ainda não sejam possíveis. Por fim, as bandas de absorção de CO são mais estreitas e de menor intensidade, resultando em um mapa com quantidade considerável de ruído. Concentram-se também na SP e em regiões de alta latitude ou altitude no geral.

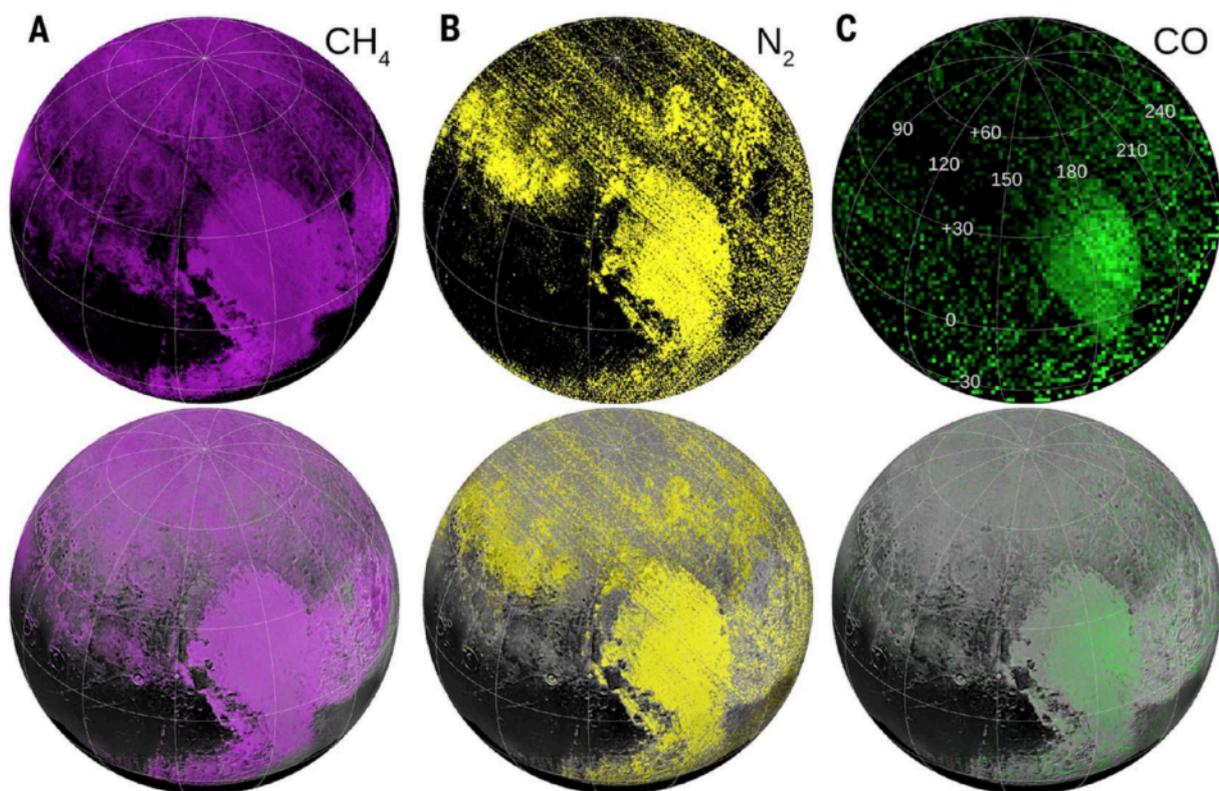


Figura 34 - Mapas tipo LEISA dos voláteis (A) CH₄, (B) N₂ e (C) CO. Os painéis superiores ilustram os mapas LEISA, nos quais as cores claras representam maiores linhas de absorção; os inferiores estão sobrepostos a mapa baseado em imagens LORRI. Fonte: Grundy *et al.* (2016).

A SP é uma das regiões que mais se destaca em Plutão, uma vez que todos os voláteis aparentam concentrar-se ali. Ela foi interpretada como uma armadilha fria (*cold trap*)

possivelmente originada a partir de uma bacia de impacto, onde gelos de compostos voláteis acumulam-se (Moore *et al.* 2016). Segundo Grundy *et al.* (2016), as elevadas concentrações de N_2 e CO , coincidentes a regiões de maior *albedo*²⁵, permitem inferir que a área é o centro da mais ativa, ou ao menos recente, zona de reciclagem convectiva.

Evidências de água e hidrocarbonetos complexos são alvos de buscas no planeta anão desde sua descoberta. Porém, todos os dados coletados, incluindo os da sonda *New Horizons* enviados até o momento, são ambíguas. Os autores, partindo do pressuposto de que água é um dos componentes não reativos (para as dadas condições ambientais) mais abundantes no contexto de formação de Plutão e capaz de formar diversas das feições observadas, correlacionaram feições de relevo, tais como cadeias de montanha e outras elevações, a linhas espectrais possivelmente representativas do composto referido, gerando um mapa de gelo de água não reativo (Fig. 35). As regiões ricas em água correspondem, de modo geral, a fundos de vale entre montanhas ou entre baixos topográficos em contraposição aos picos de elevações e altas altitudes de modo geral.

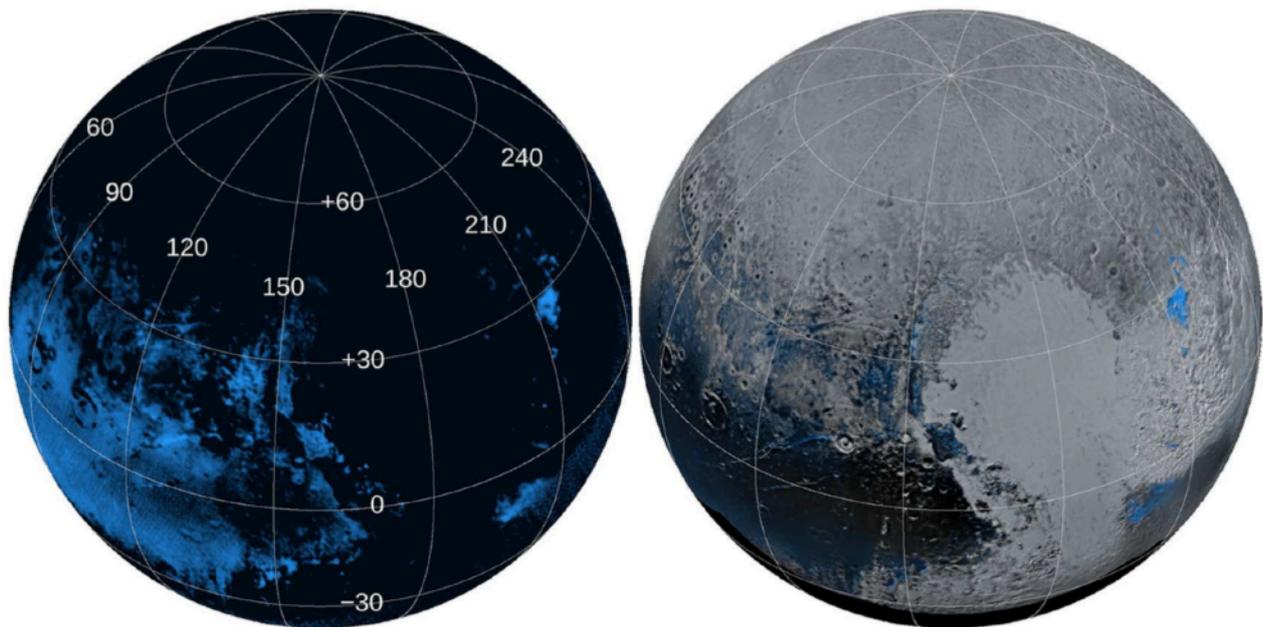


Figura 35 - Mapa da água não-reativa em Plutão, elaborado a partir das correlações brevemente descritas no texto. Fonte: Grundy *et al.* (2016).

A grande variação de cores vista em Plutão pode ser explicada por reações nos gelos induzidas pela incidência de raios cósmicos. Tanto os gases atmosféricos como as partículas sólidas na superfície estão expostas a radiação cósmica. Fótons energéticos e radiações de tipos diversos, tais como raios ultravioleta (ver seção anterior), podem induzir reações fotolíticas e radiolíticas, resultando na produção de radicais mais complexos no geral não voláteis nas dadas condições atmosféricas. Quando ocorridas na atmosfera, essas reações induzem a precipitação de partículas refratárias diversas, que precipitam-se sobre a superfície do astro. Quando ocorridas no gelo, geram mudanças composicionais em profundidades de até 1m (Wu *et al.* 2013, Wu *et al.* 2012, Kim & Kaiser 2012, Moore & Hudson 2003, Materese *et al.* 2014, Earle & Binzel 2015,

²⁵Medida da eficácia em refletir radiação/luz incidente sobre a superfície de um astro.

Johnson 1989, Cooper *et al.* 2003; *apud* Grundy *et al.* 2016). Testes laboratoriais comprovaram a formação de compostos refratários com cores similares as observadas em Plutão através dos processos referidos, como por exemplo uréia, álcoois, ácidos carboxílicos, cetonas etc. (Materese *et al.* 2015, *apud* Grundy *et al.* 2016). Possíveis variações na quantidade desses compostos, somada a heterogeneidade da distribuição dos voláteis anteriormente referidos, leva a variação do *albedo* no astro, definindo ao menos quatro regiões distintas (Grundy *et al.* 2016).

Os autores também fizeram acepções a respeito de Caronte. A lua mostrou superfície de cores comparativamente neutras, excetuando-se a *Mordor Macula* na região norte, que apresenta cor vermelha intensa. Há um *trend* geral de aumento da dominância do vermelho em latitudes altas, interrompido por crateras e outras estruturas de menor escala. Sua superfície aparenta ser composta predominantemente por gelo de água, ao menos na face voltada para a sonda *New Horizons* durante o *flyby*. A presença de amônia sobretudo no fundo de crateras possivelmente é recente, estimada como inferior a 10^7 anos de acordo com testes laboratoriais (Cook *et al.* 2007, *apud* Grundy *et al.* 2016).

Grundy *et al.* (2016) concluíram que as feições identificadas em Plutão foram geradas por uma complexa série de processos geológicos e atmosféricos, atuantes em diversas escalas. A variação na distribuição de voláteis indica controles vinculados a estação do ano, distância ao Sol, altitude e incidência de radiação, dentre outros previstos com base em observações anteriores feitas da Terra. Tipos de gelo menos reativos, tal como o gelo de água, possivelmente apresentam comportamento rígido, enquanto compostos voláteis, como monóxido de carbono ou metano, apresentam comportamento mais dinâmico, seja integrando ciclos atmosféricos complexos (caso do metano) ou fluindo de maneira similar a geleiras na Terra (como o monóxido de carbono). Os autores enfatizam, porém, que as hipóteses precisam de maior detalhamento, que será embasado por novos dados a serem enviados pela sonda no futuro e por dados coletados por missões a serem lançadas, sendo até o momento fortemente baseadas em pressupostos diversos.

9 Validade de modelos análogos terrestres no estudo de corpos planetários

Os estudos de caso apresentados anteriormente ilustram a importância fundamental de modelos análogos nas ciências planetárias de modo geral. Todas as afirmações, hipóteses e teorias a respeito da origem, características e evolução dos corpos planetários, sejam eles do Sistema Solar ou de fora dele, baseiam-se, em grau maior ou menor, em modelos análogos terrestres. A razão para isso é simples: a Terra é o único sistema planetário ao qual temos acesso direto. Podemos andar livremente sobre sua superfície e estudar criteriosamente o registro geológico, reflexo último dos processos que nela atuaram ao longo dos seus 4.6 bilhões de anos de existência.

Por meio da correlação entre produtos, no caso o registro geológico expresso sob a forma de rochas, associações de rochas e estruturas diversas, e processos, muitas vezes estudados com base em exemplos atuais e em modelamentos matemáticos construídos a partir de medições diversas, aos poucos podemos traçar a evolução de nosso planeta através dos Éons. Após um esforço de gerações, modelos que criteriosamente explicam os processos que levaram ao registro geológico tal como o observamos foram criados. Muitas vezes tais modelos são usados para se

criar outros modelos, em uma construção contínua análoga a de um muro. Outras vezes, modelos são abandonados por provarem-se pouco versáteis ou inaptos a explicar apropriadamente os fenômenos vistos.

O processo como um todo pode ser visto como uma sucessão de fases revolucionárias e de ciência normal como definidos por Kuhn (ver seção 5.1 *O paradigma e a ciência revolucionária de Kuhn*), porém com a sutil diferença de, a longo prazo, constituir uma construção cumulativa, como defendido por Popper para as ciências de modo geral (ver seção 5.2 *O racionalismo crítico de Popper*). Mesmo os modelos abandonados, como a teoria da geossinclinal, tem sua importância na elaboração de novos conceitos e teorias, seja por fornecerem bases reutilizáveis sob novas perspectivas, seja por desafiarem os novos modelos com explicações mais precisas para casos específicos, servindo portanto como falseadores de um novo paradigma (ver seção 5 *Um pouco de filosofia da ciência*).

Do processo acima descrito resulta uma compreensão geral da Terra e dos inúmeros processos nela atuantes. Ao sermos confrontados por situações novas, como, por exemplo, o estudo de Plutão, é natural utilizarmos os modelos já estabelecidos para a Terra como base para a compreensão do que é observado em oposição ao estabelecimento de conceitos a partir do zero. Os modelos existentes, e já muito bem testados, são adaptados e usados para explicar as feições observadas. Como é colocado por Garry & Bleacher (2016), nosso planeta pode ser usado como uma “*pedra de rosetta* ou *análogo* para a compreensão da geologia no Sistema Solar” (pg. xi), fornecendo as linhas gerais para o estudo de outros astros planetários.

Os modelos estabelecidos, porém, nem sempre são perfeitos. Como levantado por Massé *et al.* (2016), existem diferenças fundamentais entre a Terra e os outros corpos planetários do Universo. De acordo com os autores, as diferenças apontadas no comportamento de líquidos nas superfícies da Terra e de Marte “[...] demonstra que a interpretação de qualquer atividade atual suspeita de ser movida por água em Marte não pode ser baseada unicamente em morfologias de fluxo terrestres” (pg. 428). Considerando as várias diferenças entre os planetas e demais astros do Sistema Solar e do Universo, a conclusão acima referida pode ser extrapolada para qualquer processo atuante em outro planeta: interpretações referentes a processos atuantes em outros astros não podem ser baseadas unicamente em modelos desenvolvidos na Terra. São necessárias correções e reestruturações diversas, desenvolvidas e refinadas através do uso dos próprios modelos originais.

Plutão também é um excelente exemplo dos limites do uso de modelos análogos terrestres. Dados recentes coletados pela sonda *New Horizons* revelaram um astro extremamente complexo, cuja evolução aparenta ser controlada por processos insignificantes no contexto da Terra. Consequentemente, modelos análogos terrestres são muito limitados, podendo ser usados apenas se devidamente balizados e restringidos.

Devido a fase ainda embrionária das ciências planetárias, estabelecendo seu *modus operandi* essencial e seus conceitos fundamentais (e.g. a definição formal de planeta foi reconhecida apenas em 2006 e ainda se mostra acurada apenas no Sistema Solar, tornando o emprego de nomenclatura técnica no estudo de exoplanetas confuso). As hipóteses levantadas nos diversos estudos pouco podem afirmar. Podem ser levantadas hipóteses e criadas teorias,

mas afirmativas não podem ser feitas até que comprovações práticas sejam ao menos palpáveis. Logo, quaisquer conclusões alcançadas precisam ser definidas com a mais extrema cautela, tendo-se claro os limites de suas respectivas aplicações.

Felizmente, a grande maioria dos estudos analisados (incluindo os seis estudos de caso abordados anteriormente) demonstraram tais cuidados de maneira exemplar. Em todos os casos, foi enfatizada a natureza especulativa dos resultados e conclusões obtidas. Os métodos utilizados foram cautelosamente selecionados e analisados, testados até seus limites antes da elaboração de qualquer resultado ou conclusão. Os limites metodológicos foram bem estabelecidos, e as hipóteses geradas foram devidamente balizadas dentro dos limites do fazer científico. Talvez mais importante, direções foram sugeridas para estudos futuros, e potencialidades para a utilização de dados foram enumeradas em diversos casos.

10 Geologia planetária: nova fronteira científica

O desenvolvimento das tecnologias aeroespaciais e informáticas, demonstrados através do lançamento de equipamentos progressivamente mais complexos e versáteis e na possibilidade de medições progressivamente mais precisas de lugares cada vez mais longínquos, tem permitido avanços até então impensados nesse campo da ciência. Sobretudo em áreas ligadas ao sensoriamento remoto e geofísica, onde pode-se comprovar teorias elaboradas com base apenas em observações a distância. A existência de água no passado marciano, por exemplo, pode ser comprovada com o lançamento de missões diversas ao planeta vermelho, que identificaram estruturas sedimentares idênticas às observadas em certos ambientes da Terra. Medições do campo magnético que estão sendo feitas pela sonda *Juno* atualmente orbitando o gigante gasoso Júpiter permitirão, num futuro próximo, a comprovação de diversas teorias a respeito da natureza, formação e características de campos magnéticos planetários.

Não só existe uma enorme quantidade de dados sendo processados e aguardando processamento, como um volume ainda maior será gerado pelas missões em andamento e as que estão programadas para lançamento no futuro próximo (Tabela 2). Os novos dados, com certeza, trarão cenários imprevistos aos geocientistas planetários, e exigirão constante adaptação e inovação intelectual. Mesmo assim, prometem inúmeras inovações não só no campo, mas na maneira que encaramos a formação e evolução de corpos planetários no geral.

11 Conclusões

O trabalho executado permite concluir que:

- O uso de modelos análogos é uma ferramenta essencial nas ciências planetárias, sobretudo na Geologia Planetária, fornecendo as bases para o estudo de outros astros;
- A evolução das ciências planetárias e da Geologia Planetária pode ser visto como uma sucessão de fases revolucionárias e de ciência normal como definidos por Kuhn, com a sutil diferença de, a longo prazo, constituir uma construção cumulativa, como defendido por Popper para as ciências de modo geral;
- Grandes volumes de dados vem sendo gerados, permitindo a comprovação de hipóteses e teorias elaboradas há anos com a elaboração de novos modelos, antes impensados;

- Diversas descobertas recentes alteraram profundamente a forma como certos astros são interpretados, como a grande complexidade estrutural e composicional de Plutão ou a presença de água em Marte;
- A interpretação de imagens e dados numéricos coletados por sondas é a principal fonte de informação em Geologia Planetária, e seria inviável sem o balizamento das feições vistas aos números calculados com base em modelos análogos terrestres;
- Os modelos análogos são no geral utilizados de forma extremamente criteriosa, de modo a sempre se explicitar as limitações dos modelos e testar suas particularidades;
- As hipóteses e teorias desenvolvidas nessa área do conhecimento tem suas limitações sempre bem explicitadas e definidas, muitas vezes no campo especulativo;
- Muito sobre a formação, evolução e características dos corpos planetários é desconhecido, abrindo oportunidades para diversos estudos nas mais variadas áreas;
- As ciências planetárias e a Geologia Planetária exigem grande interdisciplinaridade, e muitas vezes incluem complexas manipulações matemáticas e estatísticas dos dados;
- Geólogos planetários devem estar preparados para se deparar com situações completamente desconhecidas e imprevisíveis; e
- Análogos de campo são de fundamental importância no planejamento de missões futuras, permitindo avaliar as limitações e maneiras de melhoramento possível para interações entre homem e máquina durante a exploração do Universo.

Referências bibliográficas

- Barnes, J. J.; Tartèse, R.; Anand, M. *et al.* 2014. The origin of water in the primitive Moon as revealed by the lunar highlands samples. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 390, pg. 244–252. doi: 10.1016/j.epsl.2014.01.015
- Bell, J. F. III; Campbell, B. A. & Robinson, M. S. 1999. *Chapter 10 - Planetary geology*. In: *Remote sensing for the Earth Sciences: Manual of remote sensing*. Editado por Rencz, A. N.. 3ª ed. pg. 509-564. John Wiley & Sons.
- Burns, J. A. 2010. The four hundred years of planetary science since Galileo and Kepler. *Nature*, vol. 466 (29). doi: 10.1038/nature09215
- Canup, R. 2013. Lunar conspiracies. *Nature*, vol. 504, pg. 27-29.
- Chao, E. C. T.; Shoemaker, E. M. & Madsen, B. M. 1960. *First natural occurrence of coesite*. *Science* 132 (3421), pg. 220-222.
- Chapman, M. 2007. Preface: the rationale for planetary analog studies. In: *The Geology of Mars: evidence from Earth-based analogs*. Editado por: Chapman, M. 1ª ed. pg. vii-ix. Cambridge University Press.
- Cosmos: uma odisséia do espaço-tempo*. *Cosmos: a spacetime odyssey*. 2014. Direção: Braga, B.; Pope, B.; Druryan, A. Cosmos Studios, Fuzzy Door Productions. Estados Unidos. DVD (16ep. - 44min).
- Dargains, S. 2009. *Teorias organizacionais contemporâneas em crise - Popper e Kuhn podem oferecer maior inteligibilidade a esta questão?* Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Filosofia, PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ.
- Dyches, P. 2016. *Mars rover views spectacular layered rock formations*. Disponível em: goo.gl/9wq9jr.
- El-Hani, C. N. 2006. Notas sobre o ensino de história e filosofia das ciências na educação científica de nível superior. in: Silva, C. C. (Org.). *História e Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências: Da Teoria à Sala de Aula*. São Paulo (Brasil): Editora Livraria da Física. pp. 3-21.
- European Space Agency [ESA] 2014. *History of cometary missions*. Disponível em: goo.gl/xCPdDk.

- Évora, F. R. R. 1993. *A revolução copernicano-galileana vol. 1 - Astronomia e cosmologia pré-galileana*. 2ª ed. Campinas. UNICAMP, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência.
- Évora, F. R. R. 1994. *A revolução copernicano-galileana vol. 2 - A revolução galileana*. 2ª ed. Campinas. UNICAMP, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência.
- Faure, G. & Mensing, T. M. 2007. *Introduction to Planetary Science - The Geological Perspective*. editora Springer, Holanda.
- Fusion energy explained - Future or failure*. Produção: Kurzgesagt - In a Nutshell. Vídeo, 6'15". Disponível em: <https://youtu.be/mZsaaturR6E>
- Garry, W. B. & Bleacher, J. E. 2016. Preface. In: *Analogues for planetary exploration*. Editado por Garry, W. B. & Bleacher, J. E. The Geological Society of America, Inc. Colorado, EUA. 483 pg.
- Geissler, P. 2016. Planetary Geology on Mars and in the Jupiter System. In: *48º Congresso Brasileiro de Geologia*. Anais do 48º CBG. Porto Alegre, RS.
- Gladstone, G. R.; Stern, S. A.; Ennico, K. *et al.* 2016. The atmosphere of Pluto as observed by New Horizons. *Science*, vol. 351 (8866). doi: 10.1126/science.aad8866
- Gleiser, M. 2015. *A ilha do conhecimento: os limites da ciência e a busca por sentido*. 3ª ed. Editora Record. Rio de Janeiro, RJ.
- Grayzeck, E. 2012. *Chronology of lunar and planetary exploration*. Disponível em: goo.gl/abgxoc.
- Grayzeck, E. 2016a. *Chronology of lunar and planetary exploration - mission timeline*. Disponível em: goo.gl/W7NHOS.
- Grayzeck, E. 2016b. *Luna 3*. Disponível em: goo.gl/dwFRZf.
- Greeley, R. & Bender, K. 1998. *Planetary geology: A teacher's guide with activities in Physical and Earth Sciences*. 2ª ed. NASA - Divisão de exploração do Sistema Solar - Escritório de Geologia Planetária.
- Grundy, W. M.; Binzel, R. P.; Buratti, B. J. *et al.* 2016. Surface compositions across Pluto and Charon. *Science*. vol. 351 (6279). doi: 10.1126/science.aad9189
- Hand, E. 2014. *Recent volcanic eruptions on the moon*. Disponível em: goo.gl/UYDOO8.
- Hawking, S. 2001. *The Universe in a nut shell*. Bantam Books. Nova York, NY, EUA.
- Hawking, S. & Mlodinow, L. 2012. *The grand design*. Bantam Books. Nova York, NY, EUA.
- Head, J. W. 2007. The geology of Mars: new insights and outstanding questions. In: *The Geology of Mars: evidence from Earth-based analogs*. Editado por: Chapman, M. 1ª ed. pg. 1-46. Cambridge University Press.
- Hodges, K. V & Schmitt, H. H. 2011. A new paradigm for advanced field geology developed through analog experiments on Earth. in: Garry, W. B. & Bleacher, J. E. eds. *Analogues for planetary exploration: Geological Society of America special paper*. pg. 17-31. doi: 10.1130/2011.2483(02).
- International Astronomical Union [IAU] 2006. *Resolution B5 - Definition of a planet in the Solar System*. Disponível em: goo.gl/5JvZL2
- Is it okay to touch Mars?* Produção: Vsauce. Vídeo, 18'36". Disponível em: <https://youtu.be/KUddy8RGwns>
- Kaula, W. M. 1968. *An Introduction to Planetary Physics - The Terrestrial Planets*. editora John Wiley & Sons, Inc.
- Kuhn, T. S. 2011. *A estrutura das revoluções científicas*. 11ª ed. São Paulo: editora Perspectiva Sa.
- Lang, K. R. 2011. *The Cambridge Guide to the Solar System*, 2nd ed., Cambridge University Press.
- Loff, S. 2015. *Apollo 11 Mission Overview*. Disponível em: goo.gl/i2YBAP
- Martins, A. F. P. 2007. História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho... *Cad. Bras. Ens. Fis.*, v. 24, no. 1: pg. 112-131.
- Massé, M.; Conway, S. J.; Gargani, J. *et al.* 2016. Transport processes induced by metastable boiling water under Martian surface conditions. *Nature Geoscience* 9, pg. 425-428. doi: 10.1038/ngeo2706.
- Moore, J. M.; McKinnon, W. B.; Spencer, J. R. *et al.* 2016. The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons. *Science*, vol. 351 (6279). pg. 1284-1293. doi: 10.1126/science.aad7055

- Myers, E. 20???. *Biogeochemistry of microbialites*. Disponível em: <https://goo.gl/9gVEC4>. Acesso: nov. 2016.
- National Aeronautics and Space Administration [NASA], Space Science Data Coordinated Archive. *Luna 3*. Disponível em: <goo.gl/8bRbl1>. Acesso: set. 2016.
- National Aeronautics and Space Administration [NASA], Solar System Exploration. *Pluto: Moons*. Disponível em: <goo.gl/ZrsKRS>. Acesso: jan. 2017.
- National Aeronautics and Space Administration [NASA], Planetary Science Division. 2013a. *Moons of the Solar System*. Disponível em: <goo.gl/x3CO7P>
- National Aeronautics and Space Administration [NASA], Planetary Science Division. 2013b. *Our Solar System*. Disponível em: <goo.gl/qcyrKY>
- National Aeronautics and Space Administration [NASA], Science Mission Directorate. 2009. *What is a Planet?* Disponível em: <goo.gl/FIMiZM>
- Noffke, N. 2015. Ancient sedimentary structures in the <3.7 Ga Gillespie Lake Member, Mars, that resemble macroscopic morphology, spatial associations, and temporal succession in terrestrial microbialites. *Astrobiology*. vol. 15 (2). doi: 10.1089/ast.2014.1218.
- Norton, K. (editora). 2015. *NASA Mission Reveals Speed of Solar Wind Stripping Martian Atmosphere*. Disponível em: <goo.gl/jzs4s6>.
- Online Etymology Dictionary. *planet (n)*. Disponível em: <goo.gl/rUuHF4>. Acesso: maio 2016.
- Pop Chart Lab. *The Chart of Cosmic Exploration*. Disponível em: <goo.gl/s6L0Kv>
- Popper, K. 2013. *A lógica da pesquisa científica*. 2ª ed. São Paulo: editora Cultrix Ltda.
- Shoemaker, E. M.; Hait, M. H.; Swann, G. A. *et al.* 1970. *Lunar regolith at Tranquility Base*. *Science* 167 (3918), pg. 452-455.
- Siegler, M. A.; Miller, R. S.; Keane, J. T. *et al.* 2016. Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen. *Nature*, vol. 531, pg. 480-501. doi: 10.1038/nature17166
- Snook, K.; Glass, B.; Briggs, G. & Jasper, J. 2007. Integrated analog mission design for planetary exploration with humans and robots. In: *The Geology of Mars: evidence from Earth-based analogs*. Editado por: Chapman, M. 1ª ed. pg. 424-456. Cambridge University Press.
- Space.com 2008. *The storied history of the word 'planet'*. Disponível em: <goo.gl/hMPNX2>.
- Space.com 2014. *What is a planet?* Disponível em: <goo.gl/cpy9EQ>
- Space probes*. 2011. National Geographic Society. Edição: Simmons, C. Produção: Wasser, J. Disponível em: <goo.gl/cF8qhG>
- Stern, S. A.; Bagenal, F.; Ennico, K. *et al.* 2015. The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons. *Science*, vol. 350. doi: 10.1126/science.aad1815.
- Szabó, T.; Domokos, G.; Grotzinger, J. P. & Jerolmack, D. J. 2015. Reconstructing the transport history of pebbles on Mars. *Nature communications*. vol. 6:8366. doi: 10.1038/ncomms9366
- Tanaka, K. J.; Skinner Jr., J. A.; Dohm, J. M. *et al.* 2014. *Geologic Map of Mars*. Acompanhamento do Scientific Investigations Map 3292. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- United States Geological Survey [USGS]. *Gene Shoemaker - Founder of Astrogeology*. Disponível em: <goo.gl/pbdsFt>. Acesso: maio 2016.
- Wenz, J. 2016. *The exoplanet next door*. Disponível em: <goo.gl/EpSN0K>.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia (1). *Babylonian astronomy*. Disponível em: <goo.gl/FE0RpY>. Acesso: maio 2016.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia (2). *Moons of Jupiter*. Disponível em: <goo.gl/kQ7I6S>. Acesso: set. 2016.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia (3). *Neptune*. Disponível em: <goo.gl/NO3MP6>. Acesso: set. 2016.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia (4). *Optical Telescope*. Disponível em: <goo.gl/oso34M>. Acesso: set. 2016.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia (5). *Planet*. Disponível em: <goo.gl/SppPYc>. Acesso: maio 2016.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia (6). *Planetary geology*. Disponível em: <goo.gl/xqaBxW>. Acesso: maio 2016.

Wikipedia, The Free Encyclopedia (7). *Pluto*. Disponível em: goo.gl/GbLfXz. Acesso: set. 2016.

Wikipedia, The Free Encyclopedia (8). *Timeline of Solar System exploration*. Disponível em: goo.gl/WPDM0A. Acesso: set. 2016.

Wikipedia, The Free Encyclopedia (9). *Voyager 2*. Disponível em: goo.gl/X9Zlgt. Acesso: set. 2016.

Anexo 1 - The Chart of Cosmic Exploration

Anexo 2 - Geological Map of Mars