UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Robert Sauer

Megainundações em Marte e na Terra: investigação de mecanismos geradores para um modelo neocatastrófico interplanetário

Florianópolis
2026

Robert Sauer

Megainundações em Marte e na Terra: investigação de mecanismos geradores para um modelo neocatastrófico interplanetário

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Michael Holz, Dr.

Florianópolis
2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Sauer, Robert
Megainundações em Marte e na Terra : investigação de mecanismos geradores para um modelo neocatastrófico interplanetário / Robert Sauer ; orientador, Michael Holz, 2026.
120 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Geologia planetária. 3. Marte (Planeta). 4. Neocatastrofismo. 5. Sensoriamento remoto. I. Holz, Michael. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Robert Sauer

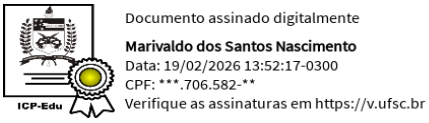
Megainundações em Marte e na Terra: investigação de mecanismos geradores para um modelo neocatastrófico interplanetário

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 05 de fevereiro de 2026, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

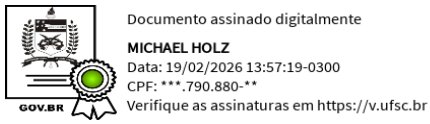
Profa. Liliana Sayuri Osako, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, Dr.
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Geologia.



Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Prof. Michael Holz, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2026.

Aos meus heróis do passado e do presente
que com sua arte me fizeram olhar para as estrelas
e imaginar outros mundos.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é fruto de dois breves anos dedicados unicamente à ciência. 2024 e 2025 foram anos em que me comprometi dia e noite a desenvolver uma pesquisa inovadora, desafiadora e sólida. A missão era audaz: explorar a fronteira da ciência — e, sobretudo, da geologia; ir além da Terra, investigar o que para mim era o desconhecido. Sempre fui fascinado pelos grandes eventos do passado geológico, principalmente aqueles ligados ao catastrofismo. Por que, então, não tentar explicar o que aconteceu ao planeta vermelho, nosso vizinho cósmico? Afinal, Marte é um mistério escondido em plena vista.

Para o sucesso dessa missão, fui honrado com a orientação do Prof. Dr. Michael Holz (UFBA), amplamente conhecido pela vasta experiência em estratigrafia. Com grande disposição e interesse, o Prof. Holz aceitou a responsabilidade de orientar um mestrando à distância, e por isso, devo a ele os meus sinceros agradecimentos. Não poderia deixar de incluir um agradecimento especial ao Prof. Dr. Leonardo Borghi (UFRJ), cuja sabedoria e erudição tem trazido luz ao meu pensamento científico desde que eu era aluno de graduação. Minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Marivaldo Nascimento (UFSC), coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geologia no qual ingressei, por todo o apoio acadêmico, parceria de aulas e campos e discussões geológicas durante o mestrado. Fui grandemente inspirado por sua maneira de enxergar a natureza e mergulhar na história da Terra. Conjuntamente, agradeço ao Laboratório de Bacias Sedimentares e Caracterização de Reservatórios (LABAC) da UFSC cujos recursos e excelente infraestrutura viabilizaram a realização desta pesquisa. Deixo um agradecimento especial ao colega “marciano” Ivan Barichivich (UFBA) que compartilhou referências bibliográficas indispensáveis e conselhos valiosos.

Finalmente, faço menção da minha família, cujo incentivo na minha busca por crescimento intelectual serviu de suporte para que eu chegasse até aqui. Acima de tudo, agradeço pelos anos que dedicaram de suas vidas para que eu pudesse desfrutar de tantos privilégios; e “com o privilégio vem a responsabilidade”.

“[…] long periods of boredom and short periods of terror.”

— Derek V. Ager

RESUMO

Megainundações são eventos de baixa frequência, da ordem de 10^4 anos, mas de magnitude gigantesca (> 1 Sverdrup), e deixaram um registro geológico inequívoco. As megainundações são causadas na Terra por vários mecanismos geológicos, como colpaso da barragem de gelo, ruptura da bacia pela erosão da borda, vulcanismo subglacial, entre outros. Em Marte, imagens de sensoriamento remoto fornecem evidências de grandes eventos de inundação em sua superfície. A causa dessas inundações geralmente está associada a erupções de grandes volumes de água subterrânea em regiões de crateras de impacto e terrenos caóticos. Essas feições são marcantes na superfície de Marte e estão ligadas à existência de lagos em crateras e depressões. Com base em uma análise completa de imagens e literatura, a presente pesquisa investiga os prováveis mecanismos envolvidos nas erupções de águas subterrâneas em Marte que levaram à formação de lagos e o mecanismo desencadeador dos eventos de megainundação. Para alcançar isso, foram adquiridas imagens de satélite de alta resolução do banco de dados das missões espaciais da NASA e do Google Earth Pro; crateras de impacto, canais e depressões caóticas foram mapeados; e um modelo teórico de megainundação foi concebido com base na planetologia comparativa. Foram mapeadas quinze crateras de impacto e cinco depressões caóticas, cada uma com pelo menos um canal de escoamento de megafluxo. O mecanismo de flexão litosférica induzida por impactos de meteoritos foi proposto como a causa das erupções de águas subterrâneas dentro das crateras e depressões. O mecanismo de ruptura da bacia pela erosão da borda foi definido como o gatilho desencadeador das megainundações originárias desses paleolagos. O modelo de megainundação consiste na combinação dos dois mecanismos e inclui: (i) estágio pré-impacto, com uma crosta primitiva fraturada e saturada em água em estabilidade antes do período de bombardeamento pesado; (ii) estágio de impacto, formação de cratera e flexura litosférica, onde uma flexura é gerada em profundidade aumentando as pressões litostática e hidrostática e a temperatura das rochas; (iii) estágio de formação de lago de cratera, quando erupções de água subterrênea inundam as crateras e o nível do lago começa a subir; e (iv) estágio de megainundação, quando o lago transborda e a erosão da borda da cratera resulta na ruptura da bacia, liberando um volume de água gigantesco e escavando um canal de megafluxo. Este modelo visa contribuir com o entendimento das causas e efeitos das megainundações em Marte, uma vez que difere dos modelos desenvolvidos para explicar as megainundações terrestres. Além disso, contribui para melhor entender a história hidrológica de Marte. Por isso, este estudo mostra a importância de um modelo alternativo sob uma perspectiva neocatastrófica.

Palavras-chave: Marte e Terra; megainundações; impactos; neocatastrofismo.

ABSTRACT

Megafloods are low-frequency events, on the order of 10^4 years, but of gigantic magnitude (> 1 Sverdrup), and have left an unequivocal geological record. Megafloods are caused on Earth by various geological mechanisms, such as ice-dam failure, basin-breach by rim erosion, subglacial volcanism, among others. On Mars, remote sensing images provide evidence of large flooding events on its surface. The cause of these floods is generally associated with outbursts of large volumes of groundwater in impact crater regions and chaotic terrains. These features are prominent on the surface of Mars and are linked to the existence of lakes in craters and depressions. Based on a comprehensive analysis of images and literature, this research investigates the likely mechanisms involved in groundwater outbursts on Mars that led to the formation of lakes and the triggering mechanism of megaflood events. To achieve this, high-resolution satellite imagery was acquired from NASA's space mission database and Google Earth Pro; impact craters, channels, and chaotic depressions were mapped; and a theoretical megaflood model was conceived based on comparative planetology. Fifteen impact craters and five chaotic depressions were mapped, each with at least one megaflow channel. The impact-induced lithospheric flexure mechanism was proposed as the cause of groundwater outbursts within the craters and depressions. The basin-breach by rim erosion mechanism was defined as the trigger for the megafloods originating from these paleolakes. The megaflood model consists of a combination of the two mechanisms and includes: (i) the pre-impact stage, with a primitive fractured and water-saturated crust in a stable state before the heavy bombardment period; (ii) the impact, crater formation, and lithospheric flexure stage, where a flexure is generated at depth, increasing lithostatic and hydrostatic pressures and rocks temperature; (iii) the formation of crater lake stage, when outbursts of groundwater infill the craters and the lake level begins to rise; and (iv) the megaflood stage, when the lake overflows and erosion of the crater rim results in the basin breach, releasing a huge volume of water and excavating a megaflow channel. This model aims to contribute to the understanding of the causes and effects of megafloods on Mars, as it differs from models designed to explain terrestrial megafloods. Furthermore, it contributes to a better understanding of Mars' hydrological history. Therefore, this study showcases the importance of an alternative model from a neocatastrophic perspective.

Keywords: Mars and Earth; megafloods; impacts; neocatastrophism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das áreas de estudo em Marte. 23
Figura 2 – Mapa geológico generalizado de Marte. 25
Figura 3 – Formação de cratera de impacto meteorítico. 33
Figura 4 – Estágios evolutivos da formação de uma cratera de impacto. 34
Figura 5 – Diagrama de fase da água para os principais planetas do Sistema Solar. 37
Figura 6 – Assimetria topográfica na superfície de Marte. 39
Figura 7 – Relação entre a história geológica de Marte e a geologia do planeta. 44
Figura 8 – Resumo comparativo da história de Marte e da Terra. 47
Figura 9 – Modelo conceitual de transbordamento de lago e inundação catastrófica. 52
Figura 10 – Esquema de um lago glacial represado por uma barragem de moraina. 53
Figura 11 – Vulcanismo subglacial como mecanismo de inundação catastrófica. 54
Figura 12 – Três diferentes canais de megafluxo subaquoso em Marte. 57
Figura 13 – A seção norte do canal de escoamento Kasei Valles, Marte. 61
Figura 14 – A desembocadura do canal de escoamento Ares Vallis, Marte. 62
Figura 15 – Modelo evolutivo de duas megainundações em Utopia Planitia, Marte. 63
Figura 16 – Representação artística da crosta média marciana saturada em água. 64
Figura 17 – Modelo de Lago em Marte para Simulações e Reconstruções Atmosféricas. 65
Figura 18 – Concepção realista de um lago na cratera Jezero, Marte. 66
Figura 19 – Classificação de crateras de impacto. 71
Figura 20 – Classificação resumida de barras deposicionais de inundação. 72

LISTA DE SIGLAS

AF	*Alluvial fan*
ASU	*Arizona State University*
BB	*Basin-breach*
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CT	*Chaotic terrain*
Ct	*Cataract*
GB	*Giant bar*
JMARS	*Java Mission-planning and Analysis for Remote Sensing*
LGM	Último Máximo Glacial (*Last Glacial Maximum)*
MDIM	*Mars Digital Image Mosaic*
MGS	*Mars Global Surveyor*
MOLA	*Mars Orbiter Laser Altimeter (Mars Global Surveyor)*
MRO	*Mars Reconnaissance Orbiter*
MSC	Crise de Salinidade Messiniana (*Messinian Salinity Crisis*)
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
ODE	*Orbital Data Explorer*
ODY	*Mars Odyssey*
PDS	*Planetary Data System*
ppd	*pixel per degree*
PSS	*Planetary and Space Science*
QCD	*Quasi Circular Depression*
QGIS	*Quantum Geographic Information System*
SL	*Streamline*
THEMIS	*Thermal Emission Imaging System (Mars Odyssey)*
USGS	*United States Geological Survey*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 OBJETIVOS 21
1.2 JUSTIFICATIVA 21
1.3 ÁREA DE ESTUDO 22
1.3.1 Localização 22
1.3.2 Contexto geológico 24
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 26
2 ESTADO DA ARTE 27
2.1 REVISÃO DOS PRINCÍPIOS FILOSÓFICOS DA GEOLOGIA 27
2.1.1 Uniformitarismo e catastrofismo 27
2.1.3 Atualismo e gradualismo 28
2.1.4 Neocatastrofismo 29
2.1.4.1 Neocatastrofismo interplanetário 31
2.2 GEOLOGIA PLANETÁRIA 32
2.2.1 Formação de crateras de impacto 32
2.2.1.1 Crateras simples e complexas 34
2.2.1.2 Bacias de impacto multianelares 35
2.2.1.3 Deformação das rochas 36
2.2.2 Planetologia comparativa 36
2.2.3 Marte 38
2.2.3.1 Atmosfera 38
2.2.3.2 Geologia 38
2.2.4 Marte e Terra: uma síntese das similaridades e diferenças 40
2.2.4.1 Aspectos gerais 40
2.2.4.2 Aspectos sedimentológicos 41
2.2.4.3 Efeito Coriolis nas inundações 42
2.2.5 Resumo da história geológica de Marte 43
2.2.5.1 Noaquiano 44
2.2.5.2 Hesperiano 45
2.2.5.3 Amazoniano 46
2.3 MEGAINUNDAÇÕES 47
2.3.1 O registro geológico de inundações catastróficas na Terra 48
2.3.1.1 Deposição catastrófica 49
2.3.2 Mecanismos geradores de megainundações 50
2.3.2.1 Colapso da barragem de gelo 50

2.3.2.2 Ruptura da bacia pela erosão da borda 52
2.3.2.3 Vulcanismo subglacial 53
2.3.2.4 Inundações causadas por deslizamentos 54
2.3.2.5 Inundações glaciares 55
2.3.2.6 Tectônica e eustasia 55
2.3.2.7 Megainundações terrestres: resumo e conclusão 56
2.3.3 O registro geológico de inundações catastróficas em Marte 57
2.3.3.1 Canais de escoamento 57
2.3.3.2 O paleoceano 62
2.3.3.3 Água líquida: descobertas recentes 63
2.3.4 Condições geológicas que induzem os mecanismos geradores 66
2.3.4.1 Presença de geleiras 67
2.3.4.2 Períodos de aquecimento climático e chuvas intensas 67
2.3.4.3 Atividade vulcânica 68
2.3.4.4 Atividade tectônica e sísmica 68
2.4 SÍNTESE CONCLUSIVA E IMPLICAÇÕES 69
3 METODOLOGIA 70
3.1 AQUISIÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE 70
3.2 FOTOINTERPRETAÇÃO DE FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS 70
3.3 CONCEPÇÃO DE UM MODELO DE MEGAINUNDAÇÃO 72
4 ARTIGO CIENTÍFICO 73
REFERÊNCIAS 103
ANEXOS 111

1 INTRODUÇÃO

Megainundações são eventos de magnitude muito grande e frequência extremamente baixa. Esses são eventos na ordem de 10^4 anos e colocaram o uniformitarismo completamente em cheque desde a década de 1980. Eventos de maior magnitude são muito raros, mesmo na escala do tempo geológico, e o intervalo entre um evento e o próximo deixa lacunas significativas no registro estratigráfico. Isso levou ao que hoje é conhecido como neocatastrofismo ou catastrofismo atualista (*e.g.*, Ager, 1981, 1993; Hsü, 1983, 1990).

Extravasamentos de grandes corpos d'água represados produzem inundações extremamente volumosas e geomorficamente impactantes que moldam a paisagem. As maiores inundações conhecidas resultaram de rupturas repentinas de represas naturais que estavam retendo enormes quantidades de água ou bloqueando enormes sistemas de drenagem. Existem duas situações geográficas mais importantes que podem levar a megainundações: (i) vales fluviais bloqueados por gelo, deslizamentos de terra ou materiais vulcânicos; e (ii) bacias fechadas, como depressões tectônicas e caldeiras, e aquelas cercadas por geleiras. Em alguns ambientes, as inundações se originam de fontes subglaciais e subterrâneas (*e.g.*, Korup & Tweed, 2007; O'Connor *et al*., 2013).

Baker & Milton (1974) representam um dos primeiros estudos sobre inundações catastróficas na Terra e em Marte, usando o evento de inundação do Lago Missoula como um análogo às feições erosivas marcianas. Desde então, muitos autores têm estudado esses eventos catastróficos em ambos os planetas (*e.g.*, Komar, 1983; Tanaka, 1986; Robinson & Tanaka, 1990; Wilson *et al*., 2004; Harrison & Grimm, 2005; Wang *et al*., 2005; Baker, 2009; Pacifici *et al*., 2009; Harrison & Chapman, 2010; Carr & Head, 2010; Cabrol & Grin, 2010; Andrews-Hanna & Lewis, 2011; Baker *et al*., 2015; Rodriguez *et al*., 2015; Lapotre *et al*., 2016; Turbet *et al*., 2017; Palumbo & Head, 2020; Gallagher *et al*., 2021).

Dados de imagens da superfície de Marte foram adquiridos ao longo de décadas de exploração espacial, principalmente por sensoriamento remoto e sondas. Desde as primeiras missões na década de 1970, um banco crescente de imagens da superfície do planeta vermelho foi criado. A exploração efetiva da superfície do planeta começou com a aterrissagem das sondas *Voyager 1* e *2*, especialmente da Missão *Mars Pathfinder*, a qual colocou em operação em 1997 o primeiro *rover* de exploração,

Sojourner, e em 2003 os *rovers Spirit* e *Opportunity*, enviando milhares de fotografias de Marte. Além do *rover* americano *Perseverance*, o qual pousou na superfície marciana em 2021, a China está também desenvolvendo um programa espacial focando em Marte — a Missão *Tianwen-1*, cujo *rover* aterrissou em 2021 e permaneceu em operação até 2022.

Como resultado dessa crescente exploração da superfície de Marte, agora há uma disponibilidade de literalmente centenas de milhares de imagens com uma enorme variedade de escalas. Os dados disponíveis mostram claramente a presença de rochas, texturas e estruturas sedimentares em Marte similares às da Terra, e fornecem evidências impressionantes de antigos canais, feções erosivas e inundações devastadoras. Então, seria possível afirmar que inundações catastróficas ocorreram no passado de Marte como ocorreram no passado da Terra? E se sim, é possível comparar os mecanismos dessas megainundações?

Vários autores têm proposto os mecanismos geológicos responsáveis pelas megainundações em Marte. Alguns deles sugerem que os impactos podem ter sido o principal gatilho para os eventos de megainundação (Wang *et al*., 2005), outros apontam para a precipitação global de chuvas quentes (Segura *et al*., 2002; Turbet *et al*., 2017). Os mais precisos e convincentes concordam com a erupção repentina de grandes volumes de água subterrânea de uma crosta superior saturada de água, seja devido ao vulcanismo subglacial (Baker *et al*., 2015) ou pressões superlitostáticas (Rodriguez *et al*., 2015). De fato, há resquícios de água líquida em rochas permeáveis na crosta média marciana (Wright *et al*., 2024), o que aponta para a existência de um aquífero confinado subterrâneo em Marte. No entanto, ainda há um elo perdido entre os impactos de meteoritos do período do bombardeamento pesado (Segura *et al*., 2002) e as respostas da crosta às pressões desses impactos.

Investigar os prováveis mecanismos ligados aos eventos de megainundação em Marte permite testar a hipótese de trabalho: se os impactos de meteoritos são a causa das erupções de água subterrânea e, consequentemente, da formação de lagos de cratera, então o mecanismo envolvido no desencadeamento das megainundações em Marte requer a proposição de um modelo conceitual evolutivo diferente daqueles desenvolvidos para a Terra.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa consistiu em investigar os principais mecanismos geradores de megainundações em Marte e na Terra. Para que esse objetivo principal fosse alcançado, foram elencados alguns objetivos específicos:

- Propor o mecanismo ligado às erupções de água subterrânea
- Entender a formação e evolução de lagos de cratera de impacto
- Identificar o principal mecanismo gerador de megainundações
- Contribuir com o entendimento da história hidrológica de Marte

Os objetivos específicos, por sua vez, foram alcançados ao longo da pesquisa e são apresentados como resultados na seção do Artigo Científico (ver seção 4).

1.2 JUSTIFICATIVA

Diversas razões justificam a iniciativa em desenvolver uma pesquisa em geologia planetária. Mais do que contribuir com o conhecimento na área, esta pesquisa pode impulsionar o desenvolvimento de estudos comparativos entre Terra e Marte (e outros corpos celestes), trazer inovação para a ciência brasileira e maior visibilidade diante da comunidade científica internacional.

É inegável que Marte é atualmente o maior alvo da exploração científica na área de planetologia. Dessa forma, para que a ciência — e a geologia, sobretudo — continue avançando, é necessário expandir as fronteiras do conhecimento humano. Marte é o planeta telúrico mais parecido com a Terra no sistema solar e, por isso, desperta grande curiosidade que, historicamente, é uma das motivações responsáveis por impulsionar o homem a alcançar o desconhecido. Assim, a exploração espacial, de maneira similar, não se limita mais ao nosso satélite natural, cuja conquista caracterizou a segunda metade do século XX; mas vai além das fronteiras da órbita terrestre, buscando novos cenários propícios à vida fora da Terra.

Esse esforço concentrado no que parece ser uma nova “corrida espacial”, traz consigo avanços e investimentos substranciais na pesquisa da geologia planetária (também denominada astrogeologia ou exogeologia). Através da pesquisa da geologia de Marte, o entendimento da história climática e hidrológica do planeta vermelho tem evoluído notavelmente nas últimas décadas. Simultaneamente, o mais recente paradigma filosófico da geologia — o chamado neocatastrofismo ou

catastrofismo atualista, postulado no início da década de 1980 por Ager, Hsü e Dott — tem revolucionado os princípios fundamentais desta ciência, princípios que até então eram consagrados na comunidade geocientífica pelo uniformitarismo atualista de Hutton e Lyell.

Não obstante à substituição do velho paradigma pelo catastrofismo atualista na geologia histórica, o novo paradigma tem sido parcialmente considerado em estudos interplanetários. Na maioria das vezes, o neocatastrofismo tem sido totalmente negligenciado quando aplicado à investigação do registro geológico de outros planetas telúricos. Isso abre espaço para questionamentos de natureza filosófica: o que está faltando na constituição do novo paradigma? Por que a geologia carece de estudos recentes demonstrando a aplicabilidade do paradigma em outros planetas similares à Terra? Como o neocatastrofismo interplanetário pode contribuir na compreensão do passado geológico dos nossos vizinhos cósmicos? Até onde podemos chegar com essa abordagem metodológica no que diz respeito ao avanço das ciência planetárias e da exploração espacial?

Esta pesquisa se propõe a investigar a superfície de Marte e o registro geológico mais recente da Terra em busca de evidências sólidas para sustentar uma interpretação neocatastrófica do passado de ambos os planetas. O alvo da investigação são as megainundações, muito significativas durante o Pleistoceno na Terra, ao final da útlima era glacial, e mais expressivas durante o Hesperiano em Marte, após o período de bombardeamento pesado. Com esse estudo comparativo interplanetário, a pesquisa tenta preencher uma lacuna relevante no estado atual de conhecimento do tema. Essa perspectiva inovadora à luz da planetologia comparativa trará importantes contribuições ao estudo da geologia planetária no Brasil. Em última análise, este estudo poderá desvendar um capítulo obscuro na história primitiva de Marte e ajudar a entender cenários potencialmente favoráveis ao surgimento da vida.

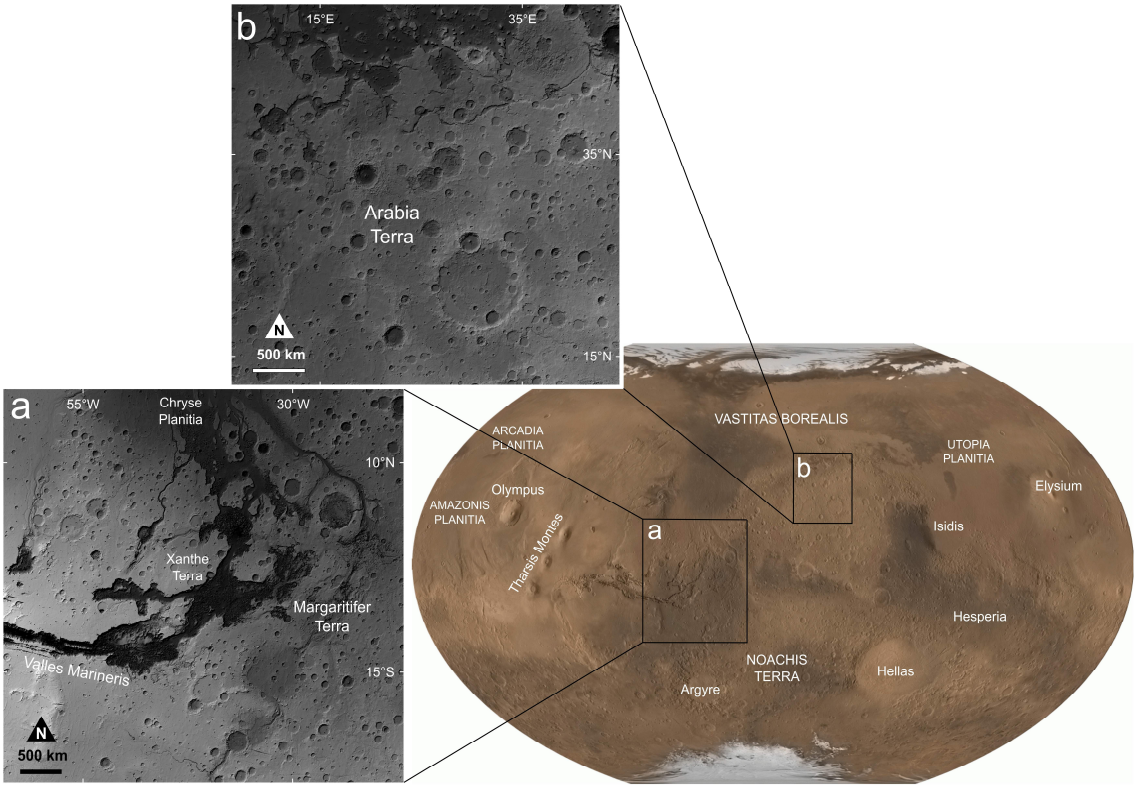
1.3 ÁREA DE ESTUDO

1.3.1 Localização

Duas áreas de estudo foram delimitadas em Marte (Fig. 1a, b). A área de estudo 1 (Fig. 1a) está situada em torno da zona equatorial marciana, sobrepondo partes dos quadrângulos de Coprates, Margaritifer Sinus, Oxia Palus e Lunae Palus (ver anexos), entre as latitudes de 20°N e 30°S. Nesta área estão localizadas as

maiores crateras, depressões caóticas e canais; e também encontram-se alguns dos maiores e mais conhecidos canais de escoamento (*outflow channels*) de Marte, como Ares Vallis, Shalbatana Vallis, Tiu e Simud Vallis, Maja Valles e Ravi Vallis.[1] A maioria destes canais têm sua descarga em Chryse Planitia, no Hemisfério Norte. Alguns exemplos de crateras são: Galilaei, Orson Welles, Morella, Holden e Masursky; depressões caóticas, como Aram, Aromatum, Hydraotes e Oxia são também importantes feições de revelo nessa área.

Figura 1 – Localização das áreas de estudo em Marte.



(a) Área 1, localizada em torno da região equatorial de Marte, (entre 20°N e 30°S). (b) Área 2, localizada no norte de Arabia Terra (entre 18°N e 45°N). Fonte: imagens do *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA), NASA.

A área de estudo 2 (Fig. 1b) está situada no norte de Arabia Terra, sobrepondo partes dos quadrângulos de Ismenius Lacus e Arabia (ver anexos), entre as latitudes de 18°N e 45°N. Nesta área, algumas crateras e canais menos conhecidos são

[1] Kasei Valles, embora um dos maiores canais de escoamento de Marte, não foi incluído na área de estudo 1 por não apresentar uma cratera de impacto ou terreno caótico em sua origem.

encontrados, como Ismenius Cavus, Deuteronilus Cavus, Mamers Valles e Indus Vallis. Os maiores canais desta área têm sua descarga em Acidalia Planitia, no Hemisfério Norte.

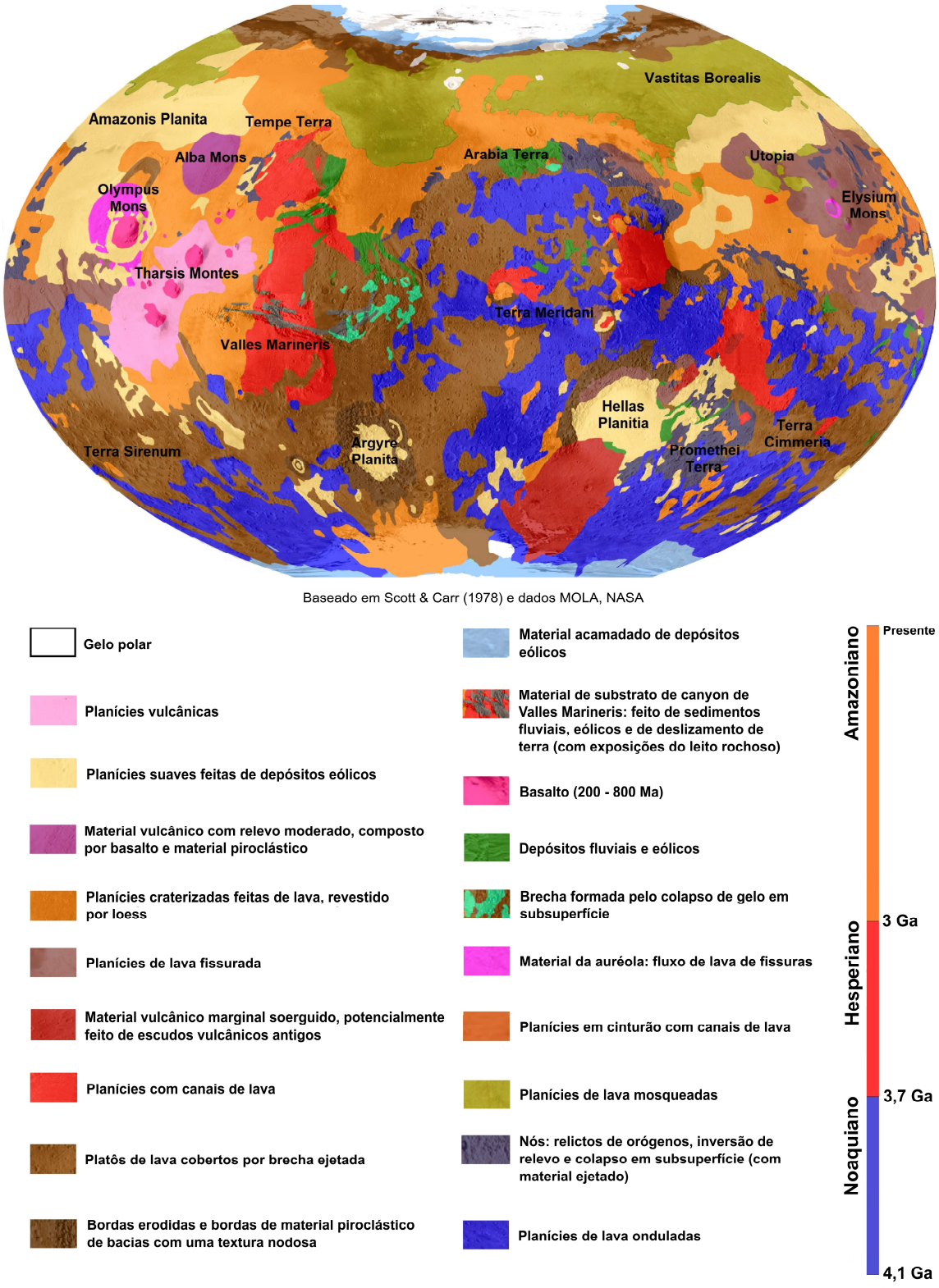
1.3.2 Contexto geológico

Essencialmente, as crateras, depressões caóticas e canais estão localizados em terrenos noaquianos e hesperianos (4,1 a 3 Ga), nas regiões de Xanthe, Margaritifer e Arabia Terra, abaixo da dicotomia global (ver subseção 2.2.3). Os canais escavam unidades mesonoaquianas e terminam em planícies eo- a neohesperianas (Fig. 2). Os três grandes períodos geológicos — Noaquiano, Hesperiano e Amazoniano — foram definidos por Scott & Carr (1978) e atualizados no Mapa Geológico de Marte do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) por Tanaka *et al*. (2014). A definição de unidades geológicas inclui morfologia, intensidade de brilho do infravermelho ou albedo, natureza da estratificação e espessura típica da unidade (com dados de altimetria do MOLA) (Tanaka *et al*., 2014).

O limite entre as regiões fisiográficas do Norte e do Sul de Marte não coincide com o equador marciano mas situa-se em torno de 20°N com algumas variações. A topografia da província fisiográfica do Norte é dominada pelo Platô de Tharsis e pelas planícies que se estendem sobre a formação Vastitas Borealis (a qual circunda o Polo Norte na latitude de 80°N) (Faure & Mensing, 2007, p. 216). Algumas planícies no Hemisfério Norte são: Amazonis, Acidalia, Chryse, Utopia, Isidis e Elysium.

Já a topografia da província fisiográfica do Sul é montanhosa e altamente craterizada. Hellas, Argyre e Isidis são as maiores bacias de impacto desta região e são preenchidas por sedimentos depositados por água e/ou vento (Faure & Mensing, 2007, p. 223). Sistemas de *canyons* ocorrem junto aos platôs vulcânicos, como Valles Marineris, convergindo para terrenos caóticos, como Margaritifer Terra. Muitos dos grandes canais emergem desses terrenos, extendendo-se em direção a Chryse Planitia (Carr *et al*., 1984). Os planaltos meridionais noaquianos recebem o nome devido à região de Noaquis Terra. Além disso, o Hemisfério Sul contém diversos cones vulcânicos muito mais jovens que os planaltos (Faure & Mensing, 2007, p. 224).

Figura 2 – Mapa geológico generalizado de Marte.



Note os três períodos geológicos à direita (baseado em Greeley, 2013). Fonte: modificado de Zasada (2013).

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo científico intitulado: ***Impact-induced lithospheric flexure and basin-breaches on Mars: a megaflood model*** (Flexura litosférica induzida por impacto e rupturas de bacia em Marte: um modelo de megainundação). O artigo foi submetido para publicação na revista *Planetary and Space Science* (PSS) em janeiro de 2026 (ver confirmação de submissão na seção 4). A organização da dissertação está disposta em quatro seções principais, como segue:

1. INTRODUÇÃO: apresenta o quadro geral da pesquisa, incluindo o tema, os objetivos, a justificativa e a área de estudo.
2. ESTADO DA ARTE: apresenta a revisão da literatura para a compreensão da evolução do pensamento filosófico na geologia, da geologia planetária e das megainundações na Terra e em Marte.
3. METODOLOGIA: descreve os métodos e técnicas utilizados na pesquisa em três etapas: aquisição de imagens orbitais, fotointerpretação de feições geomorfológicas e concepção do modelo de megainundação.
4. ARTIGO CIENTÍFICO: apresenta os resultados da pesquisa, e está estruturado em cinco capítulos: introdução, métodos, resultados e discussões, modelo de megainundação e conclusões. O artigo conclui a dissertação e é sucedido pela seção de referências bibliográficas.

2 ESTADO DA ARTE

Esta seção apresenta uma revisão teórica dos temas fundamentais que compõem o contexto científico no qual a pesquisa se insere. Inicialmente, os princípios filosóficos da geologia são revisitados, trazendo embasamento histórico para o neocatastrofismo; em seguida, é abordado o campo da geologia planetária, com foco nos conceitos de planetologia comparativa, crateras de impacto e na história geológica de Marte; e, finalmente, é apresentada uma síntese sobre o registro de megainundações na Terra e em Marte, a fim de proporcionar uma base para a compreensão dos principais mecanismos geradores.

2.1 REVISÃO DOS PRINCÍPIOS FILOSÓFICOS DA GEOLOGIA

A geologia é uma ciência histórica, pois os fatos sobre os quais ela edifica as suas teorias ocorreram em um tempo muito remoto e apenas os registros são acessíveis para estudo e interpretação (Holz, 2012, p. 7). Revoluções em determinados campos da ciência ocorrem quando há uma crise paradigmática, em que o modelo de pensamento que sustenta aquela ciência não funciona mais. Isso aconteceu na geologia, em que houve uma substituição do gradualismo pelo neocatastrofismo (Holz, 2012, p. 10). A ideia da sedimentação gradual foi derrubada com o surgimento do modelo turbidítico na década de 1950, precipitando o atualismo e forçando os geocientistas a abandonar o velho paradigma de Hutton e Lyell e adotar um novo, inaugurado por Hsü e Dott em 1983, da sedimentação episódica (Holz, 2012, p. 11).

2.1.1 Uniformitarismo e catastrofismo

O uniformitarismo é o principal princípio filosófico da geologia (Della Fávera, 2001). O termo “uniformitarismo” foi cunhado por Whewell em 1832, ao afirmar que a comunidade geológica “seria dividida entre uniformitaristas e catastrofistas” (Whewell, 1832 *apud* Gould, 1965). Clarence King (1877) afirma que “os homens nascem catastrofistas ou uniformitaristas”. O princípio do uniformitarismo é constituído por dois conceitos: o uniformitarismo substantivo e o uniformitarismo metodológico (Gould, 1965).

O uniformitarismo substantivo defendia a uniformidade de taxas ou condições dos materiais. Essa teoria já foi abandonada devido à sua natureza insustentável diante de novos dados. Gould (1965) afirma que essa teoria é falsa e danosa para a formulação de hipóteses. Por outro lado, o uniformitarismo metodológico afirma a invariância espacial e temporal das leis naturais e, assim, permanece crucial para a investigação geológica (Gould, 1965).

Apesar de aceito pela maior parte da comunidade geocientífica, o uniformitarismo metodológico depende de uma premissa frágil: as leis naturais são imutáveis espacial e temporalmente. Entretanto, como será discutido adiante, eventos de magnitude catastrófica ocorreram no passado da Terra e de Marte. Tais eventos representam desequilíbrios significativos da natureza, o que implica em alterações e/ou descontinuidades nos processos naturais no passado geológico. Isso culmina, inevitavelmente, em questionamentos quanto à inerrância do uniformitarismo: até que ponto este princípio pode ser levado em consideração na investigação da história geológica de ambos os planetas? O que as leis naturais revelam sobre os processos físicos por elas regidos?

O catastrofismo, por sua vez, sustenta que eventos naturais raros, de curta duração e alta magnitude — como grandes inundações, erupções vulcânicas, terremotos, deslizamentos de massa ou impactos — exercem papel fundamental na modelagem da superfície terrestre, na formação do registro estratigráfico e na história biológica do planeta, produzindo mudanças rápidas e significativas ao longo do tempo geológico (Summerfield, 1991). A vida na Terra, de acordo com Georges Cuvier, era frequentemente interrompida por eventos terríveis — as catástrofes (Della Fávera, 2001, p. 30). O conflito com o uniformitarismo residia nos significados substantivos, em que o catastrofismo negava a uniformidade nas variações, apelando para os paroxismos (eventos naturais extremos) de escala global (Della Fávera, 2001).

2.1.3 Atualismo e gradualismo

O atualismo propunha explicar o passado geológico como resultado de processos ainda atuantes na superfície da Terra (Della Fávera, 2001, p. 29). Esse conceito estava enraizado na frase de James Hutton “o presente é a chave para o passado”, isto é, o presente seria uma chave pois, ao observar os processos atuais, os cientistas poderiam estabelecer suas leis naturais e então extrapolá-las para o

passado (Gould, 1965). Em outras palavras, processos que ocorrem na natureza hoje podem ter ocorrido de forma similar no passado (Caxito, 2017).

O gradualismo, por sua vez, afirmava que as mudanças da superfície da Terra ocorreriam de forma lenta e gradual, como Charles Lyell acreditava. Lyell admitia mudanças constantes, ainda que incapazes de alterar as características terrestres (Della Fávera, 2001). Essa interpretação foi derrubada com o surgimento do modelo turbidítico na década de 1950, e ocorreu uma substituição do gradualismo pelo chamado neocatastrofismo (Holz, 2012). A ideia de o presente ser uma “chave para o passado” foi aos poucos sendo abandonada, dando lugar ao conceito de sedimentação episódica, estabelecido por Robert Dott em 1983 (Holz, 2012, p. 11).

2.1.4 Neocatastrofismo

Desde o início do século XX, a geologia está ciente de que eventos naturais têm durações e magnitudes muito diferentes. Um centímetro de lama pelágica em um contexto de águas profundas pode registrar milhares de anos, em um processo de natureza aparentemente contínua, corroborando o gradualismo uniformitarista. Em contraste, uma camada decimétrica com estratificação cruzada *hummocky* pode representar alguns minutos de registro geológico, e uma camada igualmente espessa de turbidito pode registrar algumas horas de sedimentação, enquanto o contato entre estratos sucessivos contém uma lacuna de centenas a milhares de anos. Então, fica claro que na magnitude de 10^3 a 10^4 anos o registro é mais pontual e episódico do que constante e gradual. Este registro, por sua vez, é formado por eventos de magnitude muito grande e frequência extremamente baixa.

Dott (1983) foi responsável por disseminar e popularizar o famoso caso das *Channeled Scablands* (EUA), onde o geólogo J. Harlen Bretz (1882-1981) formulou suas ideias neocatastrofistas revolucionárias na década de 1920, afirmando que o relevo topográfico daquela região foi erodido e moldado por megainundações durante o Pleistoceno. Baker & Milton (1974) interpretaram as mesmas feições erosivas das *Channeled Scablands*, como colinas de linhas de corrente, cataratas de canais internos e topografia de monte e bacia, como resultado de grandes inundações catastróficas. De acordo com esses autores, a maior parte da erosão produzida pelas inundações na área de *Channeled Scablands* ocorreu em cerca de um ou dois dias.

Essas inundações geraram ondulações conglomeráticas de até 10 metros de altura e com espaçamento da ordem de 100 metros, indicando uma energia de fluxo onde o cascalho grosso se comporta como partículas do tamanho de areia sob o regime de fluxo mais baixo (*i.e*., número de Froud F < 0,84-1,0). Com base no tamanho máximo dos clastos, Baker (1973) estimou velocidades de 35 m/s, teorizando uma gigantesca descarga de água que excedeu em muito o fluxo de todos os rios do mundo combinados. O trabalho do autor foi anos depois confirmado por modelagem (Alho *et al*., 2010). Apenas para fins de comparação: um regime de fluxo que gera dunas 3D (aquelas que geram estratificação cruzada festonada) em areia grossa é da ordem de "apenas" 2 m/s. Esse tipo de fluxo é produzido por rios de alta energia, durante inundações significativas. Já as correntes que moldaram as *Scablands* eram dezenas de vezes mais fortes.[2]

O mesmo pode ser dito em relação a magnitude do evento que forma tempestitos, cuja característica diagnóstica é a presença de estratificação cruzada *hummocky*. Esse depósito se forma na zona de transição *shoreface-offshore*, e tipicamente apresenta uma sucessão de camadas com estratificação cruzada *hummocky*, a qual registra alguma horas de tempestades, capeadas por lama marinha bioturbada, representando anos de deposição (*e.g*., Harms *et al*., 1975; Dott & Bourgeois, 1982).

Entretanto, mesmo monitorando a sedimentação resultante de tempestades formadas por furacões, nenhum registro de tempestito contendo *hummocky* foi jamais encontrado (*e.g*., Quin, 2011). Sendo assim, que tipo de tempestade produz um tempestito? Um tipo de evento raro e que indubitavelmente contradiz qualquer concepção uniformitarista do registro sedimentar.

Esta discussão aponta para a conclusão óbvia de que eventos de maior magnitude são muito raros, mesmo na escala do tempo geológico, e o intervalo de tempo entre um evento e o próximo deixa lacunas significativas no registro estratigráfico. Isso levou ao que hoje é conhecido como neocatastrofismo ou catastrofismo atualista (*e.g*., Ager, 1981, 1993; Hsü, 1983, 1990); que é baseado em três premissas fundamentais:

- todos os ambientes sedimentares têm dois tipos de regime de sedimentação. Um regime é marcado por longos períodos de pouca ou nenhuma

[2] Os leitores devem consultar Baker *et al*. (2016) para uma visão geral e abrangente.

sedimentação e outro regime é caracterizado por breves períodos de sedimentação muito intensa, com altas taxas deposicionais, produzindo depósitos significativos em um tempo relativamente curto;

- por causa desse mecanismo de “estagnação e continuação” que opera em praticamente todos os ambientes deposicionais, o registro sedimentar resultante é altamente descontínuo, começando na escala de laminação (*i.e.*, lacunas de minutos ou horas) e passando por praticamente todas as ordens de magnitude de tempo;
- quanto maior a magnitude, menos frequente é o evento; no entanto, maior será seu potencial de preservação, pois ele “apaga” o registro do evento anterior, ao erodir as camadas do registro subjacente. Assim, os hiatos são muito maiores do que o tempo registrado pela deposição de sedimentos.

2.1.4.1 Neocatastrofismo interplanetário

Considerando que os processos físicos são governados pelos mesmos princípios e leis naturais no tempo e no espaço, pode-se aplicar o neocatastrofismo em estudos de outras superfícies planetárias do Sistema Solar?

Após o advento da Tectônica de Placas e a exploração planetária, a comunidade científica compreendeu que a Terra não é estática (Chapman & Morrison, 1989) e que mudanças nem sempre ocorrem gradualmente (Morrison & Chapman, 1990). Descobertas de feições catastróficas, como as na superfície de Marte, continuam a revelar problemas em vários dogmas uniformitaristas, tanto os substantivos quanto os metodológicos (Baker, 1998). O termo “catastrófico”, por sua vez, só se aplica à intensidade e duração de um processo geológico específico (Baker, 1998). Morrison & Chapman (1990) definem catástrofe como “um evento único que tem um efeito maior que a ação cumulativa de todos os eventos mais frequentes e menores, incluindo os processos graduais fundamentais da geologia uniformitarista.” Os mesmos autores haviam definido o que é uma catástrofe em artigo anterior:

> Se um fenômeno é tão raro que quase nunca ocorre, talvez não precisemos nos preocupar com sua realidade. [...] Devemos nos importar, no entanto, com fenômenos raros que produzem efeitos enormes. Isso, é claro, é essencialmente a definição de catástrofe (Morrison & Chapman, 1989).

Catástrofes que influenciaram significativamente a superfície da Terra foram o resultado de impactos cósmicos (Morrison & Chapman, 1990). Muitos desses impactos excederam milhões de vezes a energia dos terremotos e explosões vulcânicas terrestres mais devastadoras (Morrison & Chapman, 1990). O neocatatrofismo deve sua emergência e consolidação ao princípio de eventos raros e à teoria de extinção em massa causada por impacto (Racki, 2015). Atualmente, é necessário admitir que eventos ligados à causas extraterrestres se tornaram um fator natural inevitável do passado geológico da Terra e de outros planetas.

2.2 GEOLOGIA PLANETÁRIA

Geologia planetária, ou astrogeologia, é o estudo das formas de relevo, processos e materiais de corpos celestiais de superfície sólida, incluindo planetas, luas e corpos menores (asteroides e cometas) (Byrne, 2020). A geologia planetária insere-se nas ciências planetárias, aplicando princípios da geologia terrestre a ambientes extraterrestres (Faure & Mensing, 2007). As ciências planetárias, por sua vez, compõem o estudo do sistema solar incluindo sua origem, mecânica celeste, geologia, geofísica e biologia.

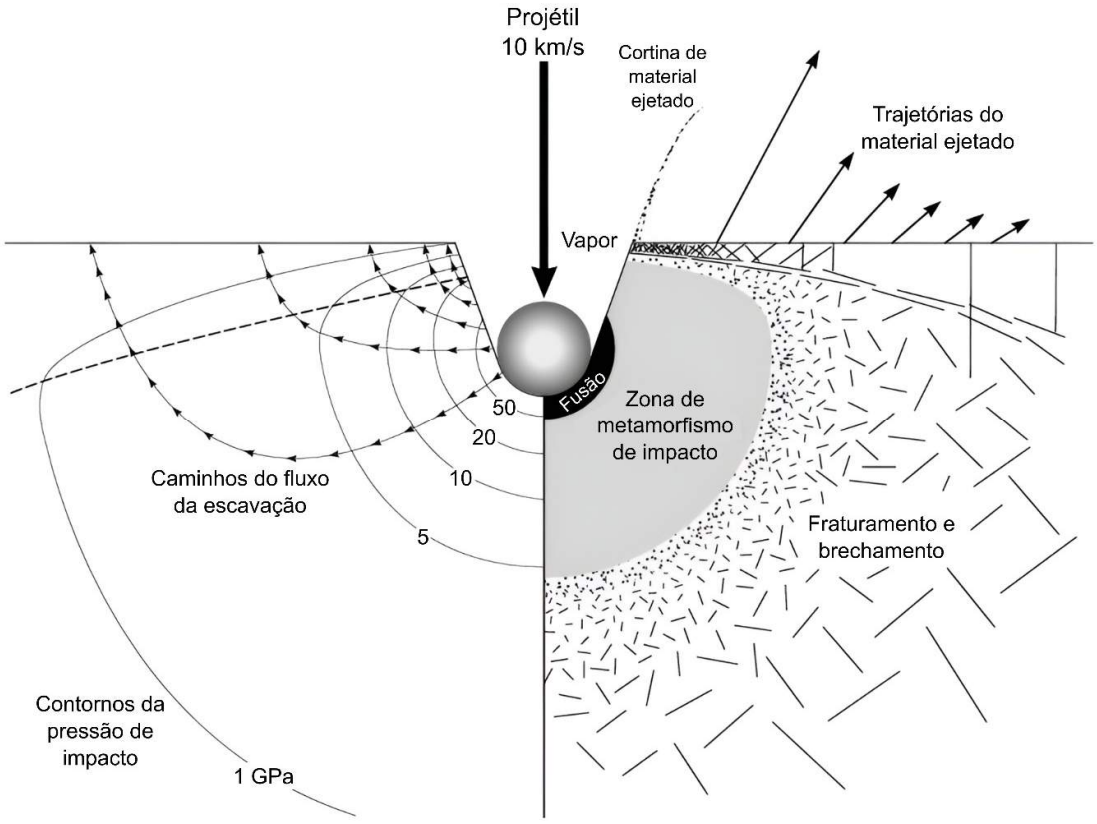
Embora a geologia planetária se apoie sobre os fudamentos consolidados da geologia clássica, precisa se valer muito mais de áreas observacionais, como sensoriamento remoto, do que esperimentais, como geologia de campo ou geologia histórica (Rossi & Gasselt, 2018, p. 3). Apesar disso, a geologia planetária tem o alcance que muitas outras áreas do conhecimento não têm, pois permite acessar mundos inatingíveis e fornece imagens fascinantes de paisagens alienígenas muitas das quais podem ter abrigado vida (Rossi & Gasselt, 2018).

2.2.1 Formação de crateras de impacto

Os impactos meteoríticos seguem uma sucessão de estágios nos quais o corpo planetário impactado é submetido a vários processos geológicos, como metamorfismo de choque ou impacto (French, 1998; Bucher & Grapes, 2011; Osinski *et al*., 2022) e até mesmo precipitação global (Segura *et al*., 2002). O primeiro estágio é a fase de colisão (Fig. 3), que é chamada de estágio de contato e compressão. Esse estágio inicial é seguido pelo estágio de escavação, o qual é seguido pelo estágio

final, de modificação (Westbroek & Stewart, 1996; French, 1998; Melosh & Ivanov, 1999; Kenkmann & Wulf, 2018) (Fig. 4).

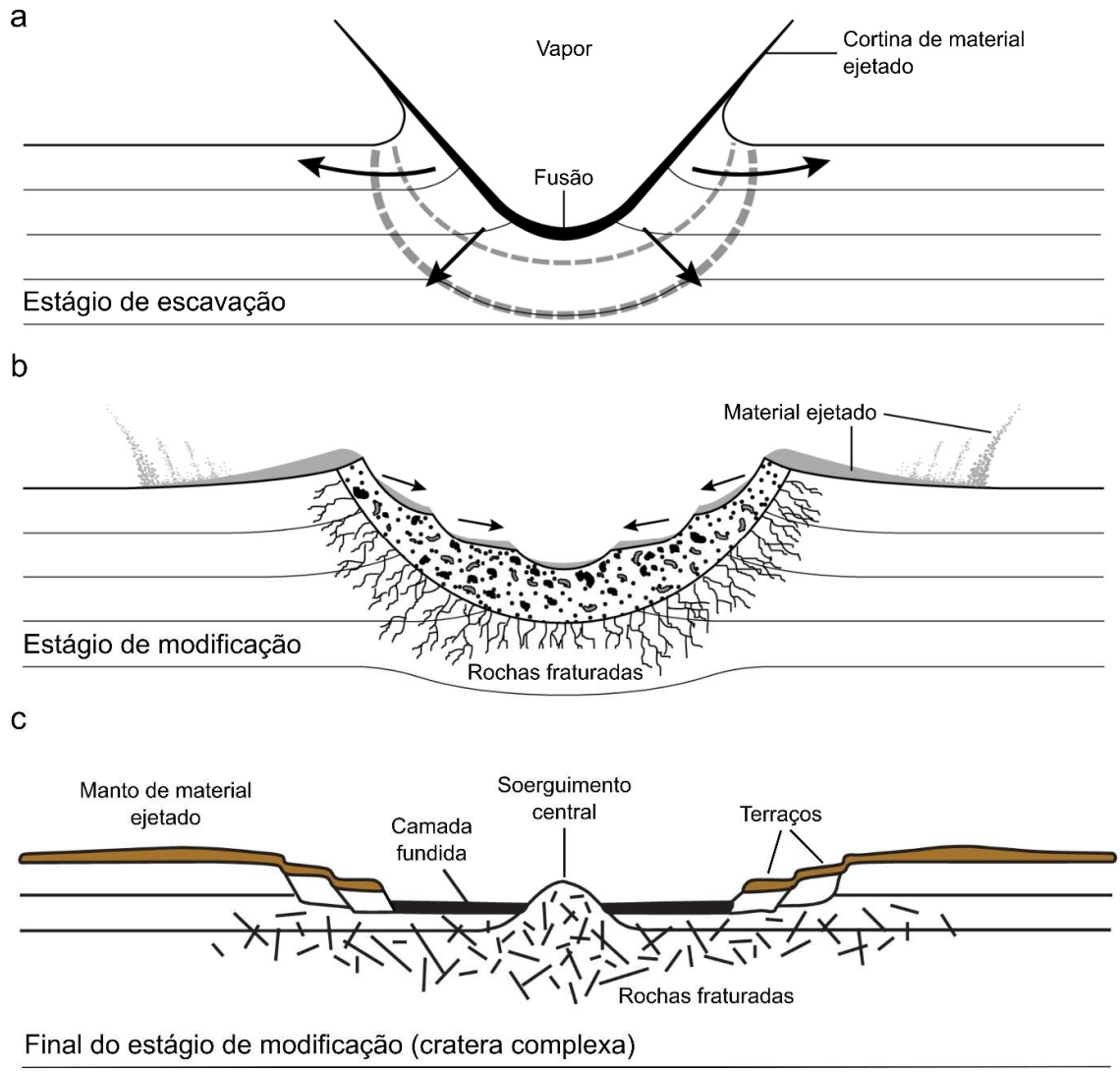
Figura 3 – Formação de cratera de impacto meteorítico.



Nesse estágio incial, a compressão de choque do projétil cria ondas de choque que se propagam pela crosta planetária atingida. Além disso, ocorre o fraturamento das rochas da crosta, geração de brechas e metamorfismo de impacto circundando a cratera. Esse processo foi dominante durante o Noaquiano Médio em Marte, e durante o Hadeano e início do Arqueano na Terra. 1 GPa (gigapascal) = 10000 Bar. Fonte: modificado de French (1998).

É no primeiro estágio de um impacto que ocorre a compressão de choque, criando ondas de choque que se propagam para as rochas do subsolo planetário. Esse é o processo no qual “o trabalho de pressão-volume é consideravelmente realizado dentro das rochas e sua energia interna é aumentada” (Osinski *et al*., 2022). É importante notar que durante as etapas seguintes (Fig. 4), há compressão física para baixo e para fora das rochas atingidas — as rochas superficiais sob os efeitos do impacto — o que gera colapso interno e queda das paredes das cavidades dentro da cratera (Osinski *et al*., 2022).

Figura 4 – Estágios evolutivos da formação de uma cratera de impacto.



(a) No estágio de escavação, as dimensões da cratera aumentam e as ondas de choque promovem o fraturamento das rochas em subsuperfíice. (b) No estágio de modificação, processos de erosão, fraturamento e deposição prevalecem. (c) No final do estágio de modificação, uma cratera complexa sobre soerguimento central e formação de terraços com o colapso das suas paredes. Fonte: (a), (b) modificado de French (1998) e (c) modificado de McSween *et al*. (2019).

2.2.1.1 Crateras simples e complexas

Crateras simples são depressões circulares com formato de tijela, bordas elevadas e perfis interiores parabólicos (Melosh & Ivanov, 1999). Uma cratera simples é formada pelo colapso da borda da cratera transitória imediatamente após esta ser formada e pela redeposição de material ejetado dentro da cratera (French, 1998; Melosh & Ivanov, 1999; Kenkmann & Wulf, 2018).

Crateras complexas exibem um soerguimento central, um assoalho plano e colapso extenso em torno da borda, criando zonas concêntricas de falhas normais (French, 1998; Melosh & Ivanov, 1999). Kenkmann & Wulf (2018) classificam esse tipo de cratera como “crateras de pico central”, cujo pico é formado no ponto onde a força de empuxo ascendente é mais forte. O final do estágio de modificação da cratera complexa envolve interações entre os efeitos das ondas de choque, gravidade e a estrutura das rochas atingidas, gerando movimentos internos e externos das rochas situadas abaixo da cratera (French, 1998).

Os estágios de contato/compressão e escavação são similares em ambos os tipos de cratera, embora ocorram em diferentes escalas e processos de fusão generalizados ocorram em crateras mais complexas (McSween *et al*., 2019, p. 197). O estágio de modificação difere em crateras complexas, em que um soerguimento central é formado e o colapso das paredes da cratera formam terraços. Já os processos de erosão e deposição podem ocorrer em qualquer tipo de cratera (McSween *et al*., 2019).

2.2.1.2 Bacias de impacto multianelares

Bacias de impacto multianelares são compostas de múltiplos anéis soerguidos concêntricos e vales criados por falhas (grabens em anéis). Essas bacias são estruturas que possuem dois ou mais anéis interiores além da borda externa da bacia (French, 1998). Nas imagens de satélite, elas exibem uma região central luminosa circundada por um sistema de elevações concêntricas. Essa topografia elevada é cercada por dezenas de grabens anelares que se extendem milhares de quilômetros do ponto de impacto (Melosh & Ivanov, 1999).

De acordo com Melosh & Ivanov (1999), as bacias multianelares se formam como uma resposta tectônica da litosfera à cavidade criada pelo impacto. A extensão do sistema de anéis indica a resistência e espessura da litosfera; anéis extensos, por exemplo, se formam em uma litosfera frágil e fina.

Segundo French (1998), bacias multianelares representam os eventos de impacto mais energéticos e catastróficos do sistema solar. O autor levanta a hipótese de que essas bacias podem se formar, por exemplo, sobre uma estrutura crustal-mantélica com uma camada frágil (a astenosfera) em profundidade no planeta.

2.2.1.3 Deformação das rochas

É importante ressaltar que em altas temperaturas e pressões litostáticas as rochas da crosta terrestre reagem por deformação dúctil ao estresse, enquanto a deformação rúptil ocorre em baixas temperaturas e profundidade rasa (Bucher & Grapes, 2011). A profundidade da transição rúptil-dúctil depende da quantidade de estresse aplicado, das propriedades mecânicas das rochas da crosta e da presença de água líquida (Bucher & Grapes, 2011). Durante a deformação rúptil, as rochas quebram e fraturam em resposta ao estresse aplicado e as fraturas criadas se enchem de água. As fraturas em rochas da crosta acima da transição rúptil-dúctil são bem conectadas e formam uma rede fraturada permeável. A água no sistema fraturado está sob pressão hidrostática. Bucher & Grapes (2011) apontam que a pressão hidrostática operando na água em uma fratura de extensão a 10 quilômetros de profundidade, por exemplo, é de cerca de 100 MPa (megapascal).[3]

2.2.2 Planetologia comparativa

A aplicação do conhecimento adquirido de séculos de estudo na Terra, para entender as propriedades, formação e evolução de outros planetas é uma abordagem denominada “planetologia comparativa” (Byrne, 2020). A planetologia comparativa é uma ferramenta de utilidade notável, uma vez que o conhecimento geológico de outras superfícies planetárias (e de outros corpos celestes rochosos) também pode ser aplicado na Terra, assim como o conhecimento da geologia terrestre é expandido para outros mundos (Byrne, 2020).

Os planetas que compõem o sistema solar apresentam camadas em sua constituição, cujas densidades crescem para o centro. A exploração espacial tornou possível identificar essa diferenciação em diferentes densidades, além de determinar o diâmetro, temperatura da superfície, massa e distribuição das massas (Pomerol *et al*., 2013, p. 48). Desse modo, foi possível entender que não há dois planetas de estrutura idêntica no sistema solar. Isso aponta para uma diversidade na natureza e na composição das diferentes camadas.

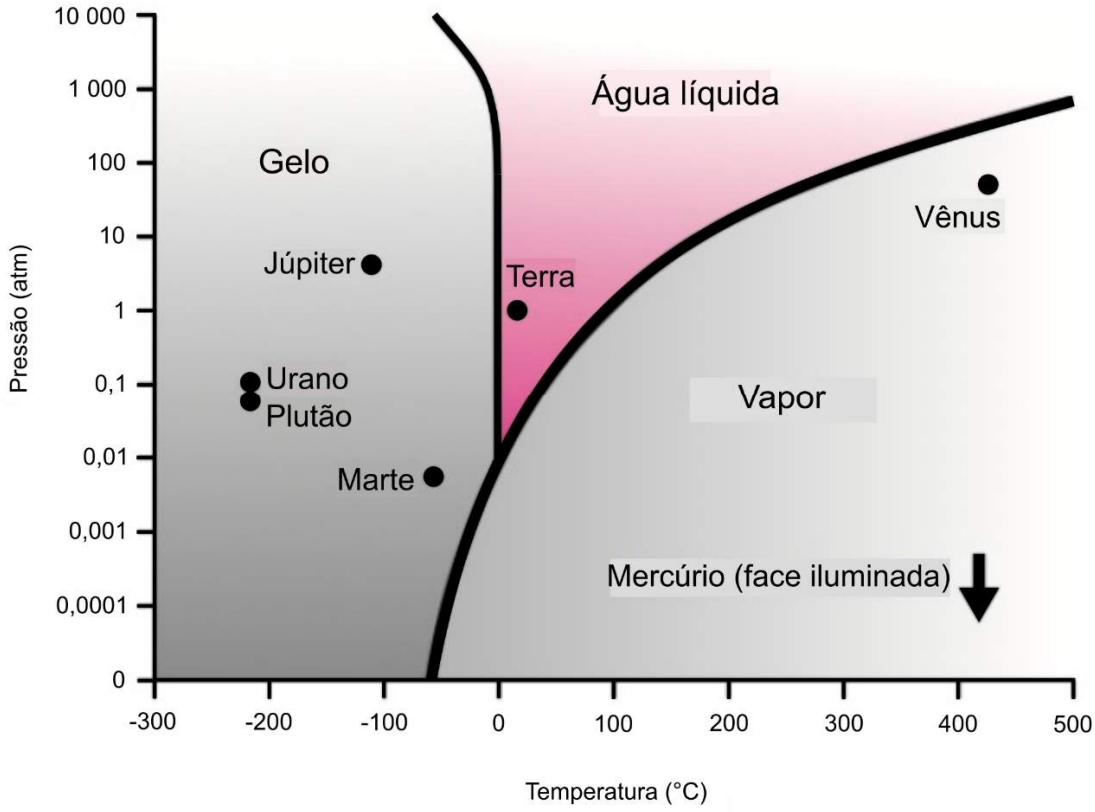
A característica mais marcante do cortejo planetário é a existência de um zoneamento a partir do Sol, onde dois grupos distintos estão organizados: Mercúrio,

[3] O equivalente a 1000 Bar ou 987 atm.

Vênus, Terra e Marte são os planetas rochosos ou telúricos (atmosferas desprovidas de hidrogênio) localizados mais próximos do Sol e relativamente pequenos e densos. Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, por sua vez, são ricos em gases, leves e muito volumosos (Pomerol *et al*., 2013, p. 49). Como estão muito afastados do Sol, a temperatura de suas superfícies cai consideravelmente.

A evolução inicial dos quatro planetas telúricos foi, provavelmente, muito similar, embora sua temperatura tenha permitido apenas a solidificação de seus silicatos e metais. Os elementos gasosos (como H e He), se perderam para o espaço, devido à incidência do vento solar (Pomerol *et al*., 2013). No diagrama de fase (Fig. 5), vê-se que a água só pode existir atualmente nos demais planetas do sistema solar sob a forma de gelo ou vapor (Pomerol *et al*., 2013, p. 67).

Figura 5 – Diagrama de fase da água para os principais planetas do Sistema Solar.



O diagrama de fase é elaborado em função da temperatura (em graus Celsius) e pressão (em atm). Fonte: modificado de Pomerol *et al*. (2013).

2.2.3 Marte

2.2.3.1 Atmosfera

A atmosfera marciana é, essencialmente, uma concentração altíssima de CO_2 (~95%), com a presença diminuta de outros gases (Ar, O, CO). A pressão atmosférica, por sua vez, é muito baixa, o que explica a ausência de água líquida na superfície de Marte (Pomerol *et al*., 2013, p. 66 e 67). A atmosfera primitiva de Marte, existente entre ~4,5 e 4 Ga, teria sido muito parecida com a atmosfera terrestre atual. Entretanto, Marte não teria conservado a sua atmosfera original em decorrência de seu tamanho pequeno, do seu afastamento do Sol e da perda de seu campo magnético (Pomerol *et al*., 2013, p. 69).

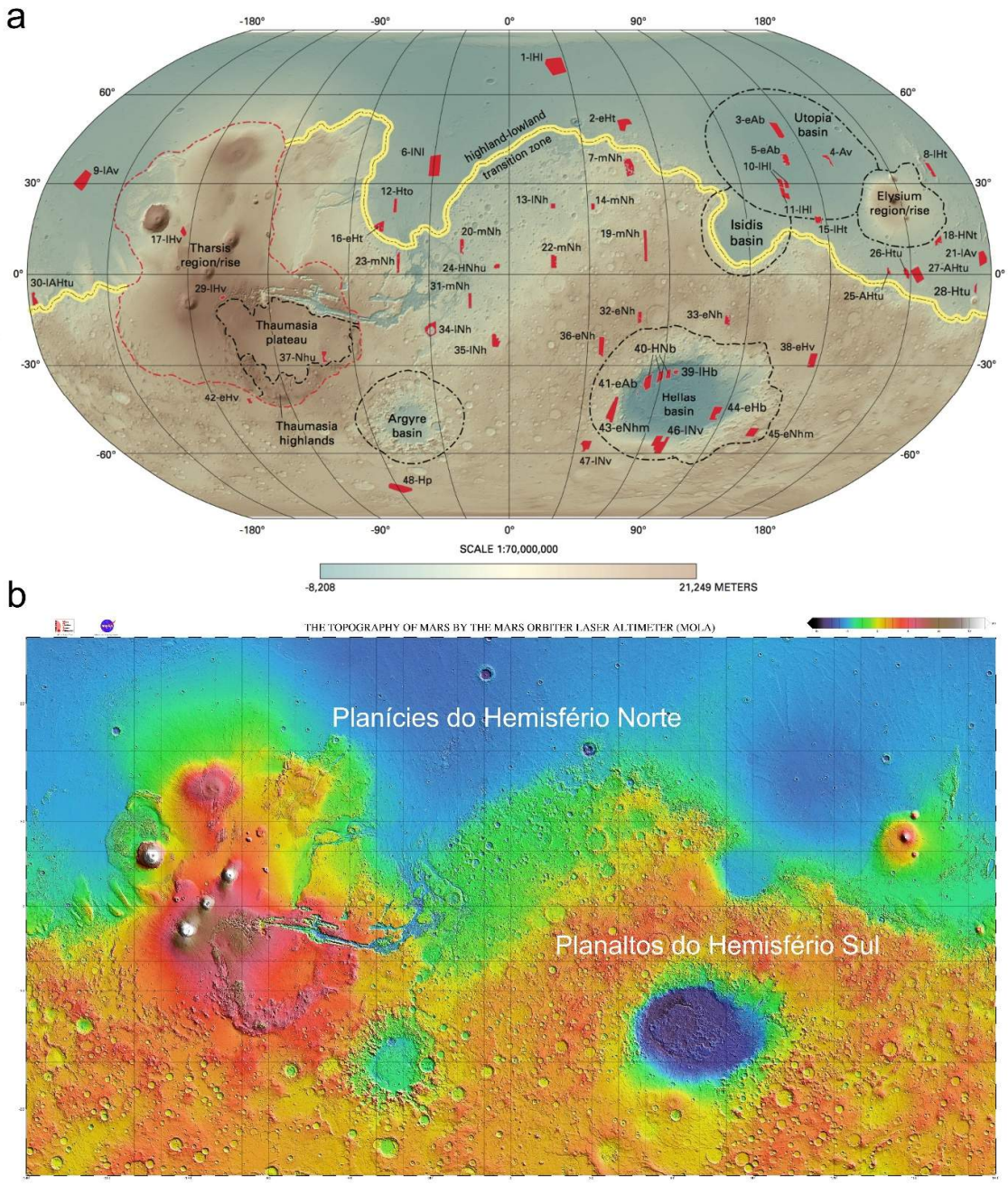
Nuvens brancas ou azuis ocorrem durante o ano marciano inteiro, principalmente sobre regiões de altitude pronunciada; as nuvens são aparentemente formadas por água ou dióxido de carbono (Carr *et al*., 1984). Nuvens amarelas tendem a aparecer nas estações de primavera e verão no Sul, as quais são interpretadas como nuvens de poeira. Tempestades de poeira variam em área, por vezes cobrem o planeta inteiro; elas desempenham papel importante na acumulação de sedimentos acamadados nos polos (Carr *et al.,* 1984).

As temperaturas em superfície variam em diferentes regiões, período do dia e estação. As temperaturas chegam a 295 K ao meio dia no verão a 25°S. As menores temperaturas registradas chegaram a 140 K durante o inverno no polo Sul (Carr *et al.,* 1984).

2.2.3.2 Geologia

A superfície do planeta é marcada por uma dicotomia global (Carr & Head, 2010), uma assimetria topográfica entre o Hemisfério Sul e o Hemisfério Norte (Fig. 6). Os planaltos do Hemisfério Sul são, em geral, terrenos muito craterizados e muito antigos (anteriores a 3,5 Ga). As planícies do Hemisfério Norte, por outro lado, são pouco craterizadas e com terrenos mais jovens (posteriores a 1,5 Ga) (Pomerol *et al*., 2013, p. 68). A aparência vermelho-ferrugem do planeta se dá pela presença do óxido de ferro (hematita) em sua superfície, por essa causa chamado de “Planeta Vermelho” (Peplow, 2007).

Figura 6 – Assimetria topográfica na superfície de Marte.



(a) Dicotomia global (linha amarela). (b) Mapa Topográfico de Marte, onde as cores quentes correspondem aos planaltos craterizados noaquianos do Hemisfério Sul, enquanto que as cores frias correspondem às planícies hesperianas e amazonianas do Hemisfério Norte. Fonte: (a) modificado de Tanaka *et al*. (2014) e (b) extraído de MOLA, NASA.

Há evidências de que água líquida percorreu a superfície de Marte (ver Fig. 7, subseção 2.2.5), possivelmente durante períodos curtos em que a pressão atmosférica era muito maior do que a atual (Byrne, 2020). A presença de redes de

vales que parecem ter sido esculpidos por água corrente é característica marcante da superfície de Marte (Carr *et al*., 1984). A exploração espacial contemporânea é ainda mais relevante caso o planeta vermelho já tenha abrigado vida.

Grandes vulcões-escudo são feições marcantes da superfície marciana, que ocorrem em duas amplas províncias: Tharsis (entre 20°S e 50°N; 90°W e 140°W) e Elysium (entre 10°N e 40°N; 200°W e 220°W). O maior cone vulcânico é o Olympus Mons, com 25 km de altitude (para comparação, o maior vulcão terrestre, Mauna Loa, chega a 9 km acima do nível do mar) (Carr *et al.*, 1984). Os vulcões-escudo de Arsia, Pavonis e Ascraeus estendem-se em um lineamento NE no topo do platô de Tharsis; Olympus mons e Alba Patera estão situados na borda ocidental do platô (Faure & Mensing, 2007). Elysium mons e seus dois vulcões menores (Albor e Hecates) situam-se no limite de Elysium Planitia (25°N/212°W).

2.2.4 Marte e Terra: uma síntese das similaridades e diferenças

Para melhor apoiar uma discussão sobre um estudo comparativo de neocatastrofismo e megainundações, é necessário lançar luz sobre as semelhanças e diferenças entre a Terra e Marte, especialmente aquelas diferenças que podem ser importantes do ponto de vista dos processos sedimentares em ambos os planetas.

2.2.4.1 Aspectos gerais

Terra e Marte são considerados planetas telúricos, que são planetas com uma crosta pelo menos parcialmente sólida feita de silicatos e ferro, conforme indicado por sua densidade. Ambos têm formas orbitais, inclinações equatoriais e duração de dias semelhantes. Em Marte, os diferentes processos geológicos (erosão, transporte, deposição) e sua episodicidade, bem como os ciclos climáticos (glaciações) são hoje surpreendentemente bem conhecidos considerando o modo remoto de análise, assim como as idades dos depósitos fluviais, glaciais e lacustres, seu tempo e episodicidade dos ciclos hidrológicos da superfície marciana e as variações do eixo de rotação/orbital desencadeadoras e as mudanças nas condições climáticas (Jaumann *et al*., 2024).

Para o escopo deste estudo, a principal diferença pertinente é o fato de que Marte é menos denso que a Terra e muito menor, tendo cerca de 15% de seu volume. Para dar uma ideia: seis planetas Marte caberiam no volume do planeta Terra. Isso

implica em um campo gravitacional que é aproximadamente dois terços menor em Marte (3,7 m/s² vs. 9,8 m/s²), o que tem implicações para processos sedimentares, tanto fluxos gravitacionais quanto subaquosos.

2.2.4.2 Aspectos sedimentológicos

Tentativas de estudar os processos físicos de sedimentação sob baixa gravidade foram feitas. Kuhn (2015) desenvolveu e testou um aparato experimental para medir a velocidade de sedimentação de sedimentos de diferentes densidades, tamanhos e formas e realizou alguns testes específicos a bordo de voos parabólicos com gravidade reduzida. Ele concluiu que partículas sob gravidade marciana se acomodam mais rapidamente e têm uma distribuição muito mais estreita nas velocidades de acomodação. Experimentos adicionais (Kuhn *et al*., 2016) revelaram que os erros observados na velocidade de sedimentação ao usar modelos terrestres e valores de parâmetros em Marte têm implicações para o movimento e classificação de sedimentos, em particular para areia e cascalho. Assim, parece que a classificação em Marte é menos pronunciada para determinadas condições de fluxo do que na Terra.

Obviamente, não há observações ou medições diretas de fluxos aquosos em Marte, mas modelagens teóricas de fluxos de inundação (*e.g*., Komar, 1980; Burr *et al*., 2006) indicaram que mesmo em condições de baixa profundidade de água, os sedimentos em Marte tenderiam a se mover mais prontamente do que em condições comparáveis na Terra. A menor gravidade em Marte produz um fluxo de água mais lento, o que tende a resultar em menos movimento de sedimentos, mas também uma menor velocidade de sedimentação, o que tende a resultar em mais movimento de sedimentos. A modelagem mostra que, nessas duas tendências compensatórias, o efeito da menor velocidade de sedimentação predomina (Komar, 1980; Burr *et al*., 2006). O resultado é que para um dado fluxo e tamanho de grão, o modo de transporte de sedimentos é mais provável de ser suspensão ou deflúvio em Marte em contraste com a carga de fundo na Terra. Por outro lado, pode-se afirmar que tamanhos de grãos mais grossos são mais facilmente transportados em Marte em contraste com a Terra (Lapotri & Ielpi, 2020).

Isso significa que equalizando outras condições físicas, como relevo topográfico e declives de canais, o volume de descarga de água e o tamanho de grão

disponível, as formas de leito deposicionais marcianas seriam formadas por sedimentos mais grossos em comparação com as formas de leito deposicionais da Terra, e aparentemente mais sedimentos podem ser esperados para ter sido transportados em suspensão ou como deflúvio (Carling *et al*., 2009). O estudo de Braat *et al*. (2023) usando um modelo analítico de um canal aluvial marciano apresenta conclusões semelhantes. Os autores usaram vários previsores de transporte de sedimentos fluviais para calcular a taxa de transporte de sedimentos para uma variedade de tamanhos de grãos (de argila a matacão), concluindo que em Marte grãos maiores são mobilizados e transportados em suspensão; e que a magnitude do fluxo de transporte por suspensão também é maior em Marte. Outros estudos especulam que em Marte grãos maiores são mais facilmente arrastados em comparação com a Terra (*e.g*., Grotzinger *et al*., 2013) e que o transporte de sedimentos suspensos em canais fluviais é mais eficiente em Marte (*e.g*., Amy & Dorrell, 2021). Outros apontam que fluxos hiper-concentrados podem ser comuns (*e.g*., Burr *et al*., 2006).

Com base nessa conjectura especulativa pertinente, a comparação direta da textura (*i.e*., tamanho de bloco e matacão, conteúdo de areia e lama) associada aos registros de megainundações na Terra e em Marte aparentemente tem essa desvantagem: um registro sedimentar em Marte mostrando uma quantidade maior de sedimentos grossos e matacões enormes em comparação a um registro na Terra não significa necessariamente que um evento foi mais intenso do que o outro. Especula-se que a comparação da textura e concentração do sedimento não é diretamente válida para dar suporte a conclusões sobre a magnitude dos eventos devido às diferenças na transportabilidade do sedimento causadas pela diferença na gravidade entre ambos os planetas.

2.2.4.3 Efeito Coriolis nas inundações

Modelagens hidrológicas e estimativas hidráulicas indicam que as inundações responsáveis pela escavação dos grandes canais de escoamento em Marte foram eventos de alta descarga ($Qp > 10^6 – 10^7$ m^3/s), curta duração (dias a semanas) e alta energia, controlados principalmente por extravasamentos de água subterrânea e gradiente topográfico (e.g., Andrews-Hanna & Phillips, 2007; Rodriguez et al., 2015).

A influência potencial do efeito Coriolis nesses fluxos pode ser avaliada por meio do número de Rossby (Ro), que envolve a velocidade do escoamento, a escala horizontal do sistema e o parâmetro de Coriolis. Considerando valores típicos inferidos para as inundações em Marte, tem-se valores de Ro muito maiores que 1 (entre 10 e 50, aproximadamente). Nesses regimes, as forças inerciais superam amplamente os termos rotacionais, indicando que o escoamento foi dominado por inércia e gravidade, com contribuição desprezível do efeito Coriolis.

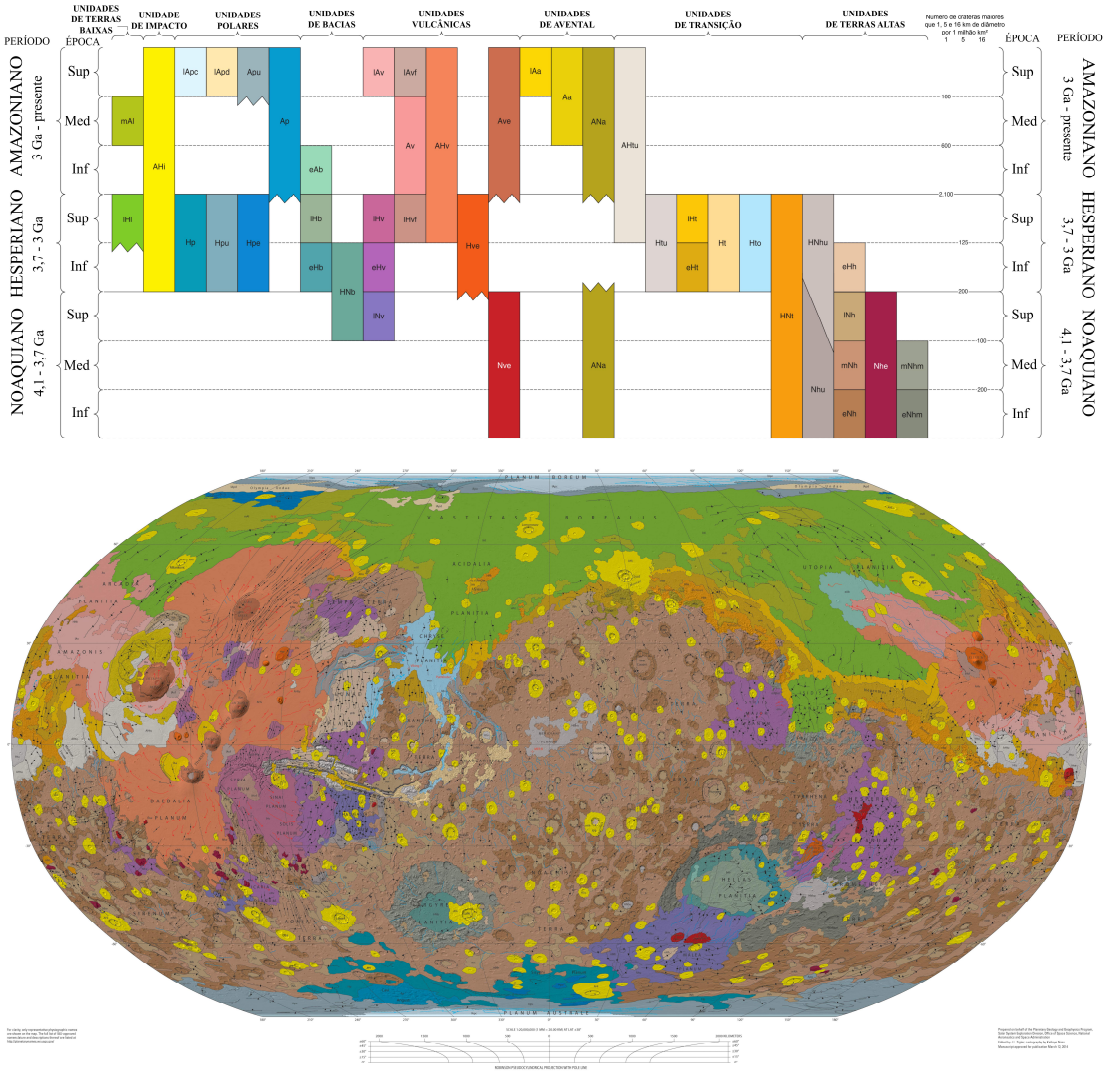
2.2.5 Resumo da história geológica de Marte

A história geológica de Marte foi subdividida em três períodos principais: Noaquiano, Hesperiano e Amazoniano (Scott & Carr, 1978; Scott & Tanaka, 1986; Tanaka, 1986; Carr & Head III, 2010; Carr & Head, 2010; Tanaka *et al*., 2014; Baker *et al*., 2015). Esta subdivisão foi baseada nas relações de intersecção e nos números de crateras de impacto sobrepostas (Tanaka, 1986; Carr & Head, 2010). Embora essa escala de tempo seja relativa, as distribuições de frequência do tamanho das crateras de impacto para as unidades maiores associadas a esses períodos permitiu estimar idades “absolutas” (Greeley, 2013). As idades numéricas também são baseadas em estatísticas de idade de crateras calibradas com o registro lunar (Vita-Finzi & Fortes, 2013, p. 172)

Tanaka (1986) redefiniu a cronoestratigrafia de Marte, conforme proposto por Scott & Carr (1978), em oito séries, cada uma delas correspondendo a oito épocas distintas: Noaquiano Inferior, Médio e Superior, Hesperiano Inferior e Superior, e Amazoniano Inferior, Médio e Superior (Fig. 7). O período Noaquiano foi nomeado em referência à Noaquis Terra; o Hesperiano foi nomeado em referência à Hesperia Planum; e o Amazoniano em referência ao Amazonis Planum (Carr & Head, 2010).

A maioria dos autores (*e.g*., Carr & Head III, 2010; Cabrol & Grin, 2010; Vita-Finzi & Fortes, 2013; McSween *et al*., 2019) entendem que o primeiro período geológico, o Noaquiano, começaria a partir do período de bombardeamento pesado (~4,1 Ga). Estes autores consideram a época anterior, de 4,5 a 4,1 Ga, como uma “era pré-Noaquiana”, que corresponde ao tempo de formação do planeta, diferenciação de crosta, manto e núcleo e formação da dicotomia global. Outros autores (*e.g*., Faure & Mensing, 2007; Greeley, 2013) posicionam o Noaquiano no início da história geológica de Marte, em torno de 4,6 a 4,5 Ga.

Figura 7 – Relação entre a história geológica de Marte e a geologia do planeta.



Os três períodos geológicos, do mais antigo ao mais recente, são: Noaquiano, Hesperiano e Amazoniano. Fonte: modificado do Mapa Geológico de Marte da *United States Geological Survey* (USGS) (Tanaka *et al*., 2014).

2.2.5.1 Noaquiano

Em geral, o Noaquiano (4,1 a 3,7 Ga) — equivalente ao final do Hadeano e Eoarqueano na Terra — foi caracterizado por altas taxas de formação de crateras, erosão e incisão de vales (as mais altas em comparação com os períodos subsequentes). Além disso, a presença de campo magnético nos primeiros 100 milhões de anos era ativa. Condições climáticas favoráveis à atividade fluvial eram raras, ligadas a grandes impactos e erupções vulcânicas (Carr & Head III, 2010).

Durante o período Noaquiano, a paisagem foi intensamente degradada, levando a enormes quantidades de detritos erosivos. Feições fluviais foram formadas em canais de escoamento, que são atribuídos ao transbordamento de lagos (Carr & Head III, 2010). As crateras noaquianas possuem bordas bastante erodidas e interiores parcialmente preenchidos (Cabrol & Grin, 2010).

De acordo com Tanaka (1986), a litosfera de Marte era espessa, fria e elástica na Época Noaquiana Inferior, o que foi responsável pela preservação de grandes formas de crateras, como é o caso de Hellas. O período final de bombardeamento pesado em Marte, com altas taxas de crateras e bacias de impacto menores, foi a Época Noaquiana Média. A Época Noaquiana Superior registrou condições quentes episódicas, sugeridas por evidências geomórficas de lagos e rios e movimento de águas subterrâneas (Tanaka, 1986; Carr & Head, 2010). A precipitação e circulação hidrotermal foram necessárias para reabastecer o sistema de água subterrânea que teria sustentado um fluxo contínuo ou episódico.

2.2.5.2 Hesperiano

O Hesperiano (3,7 a 3 Ga) — que coincide com o Paleoarqueano e Mesoarqueano na Terra — foi caracterizado por intensa atividade vulcânica episódica, formando grandes planícies de fluxos de lava e baixas taxas de erosão e formação de vales (Carr & Head, 2010). Por outro lado, vários canais de escoamento foram formados, bem como seus lagos e/ou mares terminais (Carr & Head, 2010). Os canais de escoamento podem ter sido criados devido à erupção de enormes volumes de água, que provavelmente foram represados em lagos, geleiras ou mesmo armazenados em aquíferos. Harrison & Grimm (2005) e Baker (2009) concordam com essa suposição, alegando que o início desses canais em terrenos caóticos sugere o extravasamento de água subterrânea, possivelmente um antigo aquífero confinado.

A taxa de caterização foi reduzida durante a Época Hesperiana Inferior, quando comparada ao período anterior (Tanaka, 1986). Grandes áreas vulcânicas, incluindo caldeiras e vulcões, e sistemas de *canyons*, como o Valles Marineris, eram bem desenvolvidos. A atividade vulcânica intensa é atestada por planícies estriadas, que ocorrem em torno de Tharsis (Cabrol & Grin, 2010) e Elysium. A Época Hesperiana Superior foi marcada pela atividade vulcânica progressiva em muitas regiões vulcânicas (Tanaka, 1986). Além disso, durante essa época, a deposição de

sedimentos em camadas seguiu a formação de canais. Isso é registrado próximo à região de Valles Marineris e em Kasei Valles, onde vários níveis de terraço e terreno caótico apontam para múltiplos estágios de formação de canais (Tanaka, 1986).

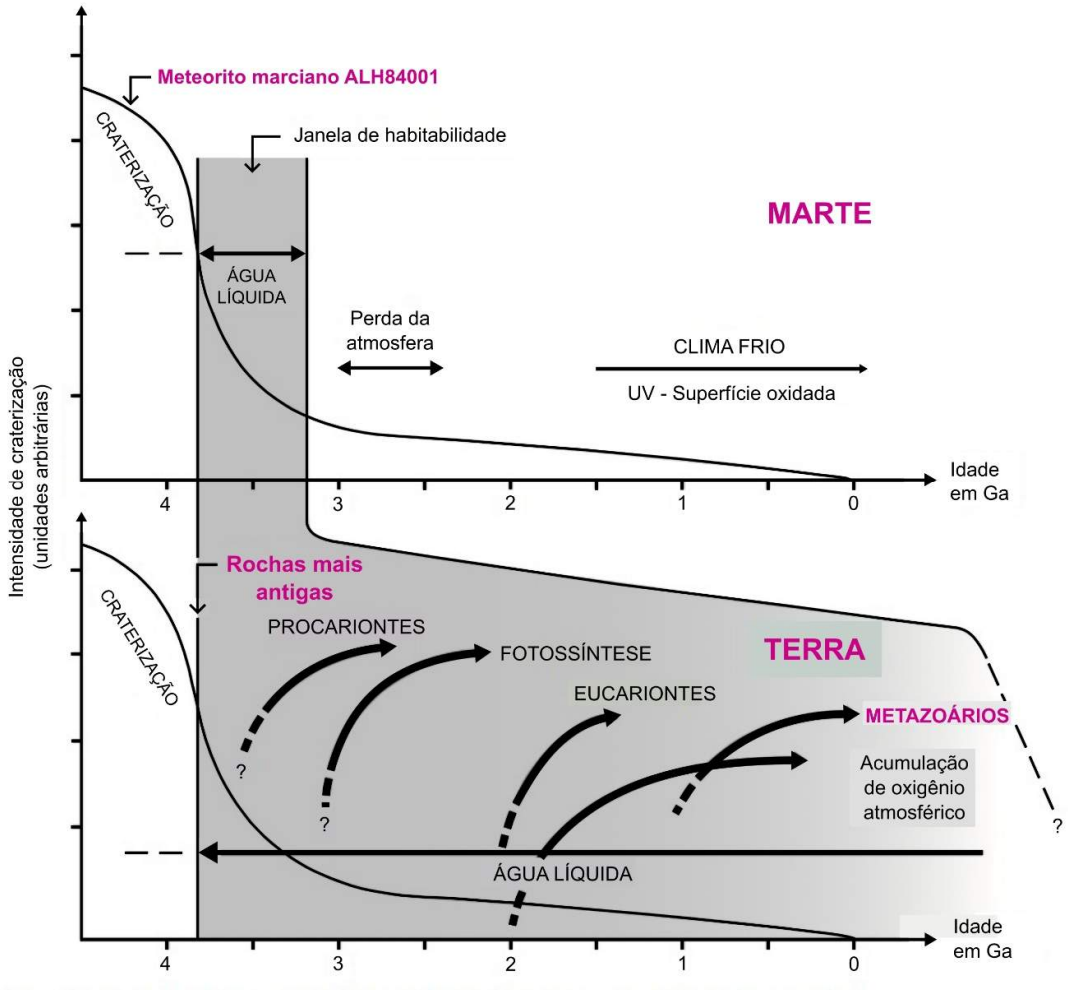
2.2.5.3 Amazoniano

Evidências da presença de gelo na superfície de Marte são muito frequentes durante o próximo período geológico marciano: o Amazoniano (3 Ga até o presente), equivalente ao Neoarqueano, Proterozoico e Fanerozoico terrestres. O acúmulo de vastas camadas de gelo no Amazoniano pode ser consequência de mudanças climáticas ocorridas como resultado de inundações catastróficas (Carr & Head III, 2010). Baker (2009) afirmou que a maior parte da superfície de Marte está localizada acima de uma espessa zona de *permafrost*, e isso pode explicar como a água subterrânea estava confinada. Carr & Head (2010) apontam que o gelo desempenhou um papel significativo na modificação da paisagem no Amazoniano. De acordo com esses autores, extensos depósitos de gelo se formaram após as inundações do Hesperiano, incluindo os polos.

Durante a Época Amazoniana Inferior, o vulcanismo ainda desempenhou um papel principalmente nas regiões de Tharsis e Elysium, mas a taxa foi menor do que no período anterior (Carr & Head, 2010). A atividade geológica foi reduzida durante a Época Amazoniana Inferior, e taxas extremamente baixas de erosão e intemperismo continuaram (Tanaka, 1986; Carr & Head, 2010). Nas Épocas Amazonianas Média e Superior, depósitos de camadas polares, dunas e gelo estavam sendo retrabalhados e as planícies do norte estavam se consolidando. As inundações haviam acabado, com algumas pequenas inundações ocorrendo episodicamente.

A história de Marte revela a fragilidade das condições de habitabilidade de um planeta (Fig. 8). Essa propriedade corresponde a condições físico-químicas estritas, que Marte conheceu no seu passado remoto, mas que perdeu muito cedo e muito rapidamente (em menos de 500 Ma), enquanto que elas perduraram na Terra (devido ao tamanho, proximidade do Sol e persistência dos processos da tectônica de placas e do campo magnético) (Pomerol *et al*., 2013, p. 73). Assim, um ambiente potencialmente favorável ao desenvolvimento da vida existiu em Marte quando as condições iniciais de ambos os planetas eram bastante próximas (a janela de habitabilidade).

Figura 8 – Resumo comparativo da história de Marte e da Terra.



A água líquida esteve presente em Marte durante os seus primeiros bilhões de anos, a “janela de habitabilidade”. Fonte: modificado de Pomerol *et al*. (2013).

2.3 MEGAINUNDAÇÕES

Após o reconhecimento de inundações descomunais e anormais no registro geológico, vários termos foram usados para designar esse tipo de evento, como “inundação cataclísmica”, “inundação catastrófica” ou mesmo “inundação diluviana”. Hoje em dia, parece haver uma tendência para o termo “megainundação”, embora tenha sido usado inicialmente sem uma definição objetiva. Atualmente, uma megainundação é caracterizada por descargas de pico (Qp) superiores a 1 milhão de metros cúbicos por segundo, designadas como “1 Sverdrup”, uma unidade de fluxo de água nomeada em homenagem ao pioneiro oceanógrafo norueguês Harald Sverdrup (Baker, 2002); e, mais recentemente, Baker & Carling (2020) sugeriram que

inundações altamente energéticas (<1 Sverdrup) podem ser denominadas “superinundações”. No entanto, a distinção e o registro físico entre megainundações e superinundações ainda estão em debate (*e.g.*, Carling & Fan, 2020).

Devido a essas tremendas taxas de fluxo, uma megainundação é um evento com um impacto tão grande em relevos e biotas que muitos o designam como inundação catastrófica, embora conceitualmente esse termo de caráter antropomórfico não seja preciso: inundações "normais", com taxas de fluxo muito menores, como recorrentes em sistemas flúvio-deltaicos, podem ser muito "catastróficas" para cidades e habitantes dessas áreas. No entanto, os termos megainundação e inundação catastrófica parecem ser usados de forma intercambiável.

2.3.1 O registro geológico de inundações catastróficas na Terra

Grandes eventos de inundação são conhecidos pela geologia e objeto de investigação desde a década de 1920, quando o geólogo J. Harlen Bretz interpretou a paisagem marcada por enormes barras cascalhosas (matacões) e matacões erráticos transportados por gelo de *Scablands*, no leste do estado de Washington (EUA), como resultado de uma megainundação causada pelo Lago Missoula. Desde então, dezenas de locais de megainundações foram descobertos apenas para o período Pleistoceno/Holoceno, e análises sedimentológicas, geomorfológicas e geoquímicas intensas (*e.g.*, Svistunov *et al*., 2022), mesmo associadas à modelagem numérica (*e.g.*, Morey *et al*., 2022) levaram a um maior reconhecimento da magnitude e frequência desses eventos. Por exemplo, onde Bretz viu a inundação Missoula, estudos estratigráficos mais recentes indicam aparentemente mais de uma centena de inundações Missoula separadas durante o último período glacial (O'Connor *et al*., 2020).

Vale ressaltar que apenas uma parte muito pequena das megainundações documentadas foi principalmente o resultado de condições meteorológicas e fontes de água atmosféricas. Inundações de grande escala resultaram de rupturas repentinas de represas naturais que estavam retendo grandes quantidades de água ou bloqueando enormes sistemas de drenagem (*e.g.*, Carling, 2017). As maiores inundações são associadas a colapsos de lagos quaternários retidos por geleiras (Carling, 2017). Em algumas partes do mundo, esses eventos são bem conhecidos

pelas populações. Os habitantes da Islândia, por exemplo, têm um termo para tais eventos de drenagem repentinos — *jökulhlaup* (literalmente: “explosão de geleira”).

2.3.1.1 Deposição catastrófica

Megainundações são responsáveis pela deposição de espessas camadas de sedimentos grossos e finos, em diferentes contextos. Sedimentos grossos tendem a ser depositados nas porções altas da área inundável enquanto que os sedimentos finos podem formar sequências distais (Carling, 2017).

Depósitos de sedimentos mais grossos são encontrados em expansões de fluxo ao longo do curso da inundação, e as barras resultantes podem ser classificadas, de acordo com Carling (2017), como:

- Barras de expansão – ocorrem onde o fluxo da inundação se alarga repentinamente, e consistem em um depósito deltaico de sedimentos grossos trativos; a superfície da barra geralmente exibe estrias longitudinais e valas;
- Barras de pontal – são similares àquelas formadas nos fluxos de canais menores, porém são muito maiores. A deposição ocorre na curva interna do canal de inundação;
- Barras eddy – se formam devido à separação do fluxo ao longo das margens do canal de inundação, de modo que o fluxo recircula dentro de baías das margens do canal;
- Barras pendentes – ocorrem atrás de obstáculos isolados situados no meio do fluxo principal, como pequenas colinas ou afloramentos rochosos.

Geralmente, barras de expansão se formam na base do fluxo principal e são compostas de cascalho grosso. Os outros tipos de barras tendem a ocorrer junto às margens do fluxo principal e podem apresentar gradações distintas desde grandes matacões até sedimentos finos.

Carling *et al*. (2009a) ressaltam que a presença de uma feição em particular não é necessariamente diagnóstica de uma megainundação. A escala ou amplitude da feição pode indicar a profundidade da água já que as barras formadas por inundações se desenvolvem durante a máxima profundidade da descarga. Além disso, associações de feições podem se formar, o que corrobora uma interpretação favorável à deposição catastrófica.

A presente revisão sobre os principais tipos de mecanismos desencadeadores de megainundações servirá como base para uma discussão sobre a ocorrência e origem desses eventos e mecanismos geradores em Marte.

2.3.2 Mecanismos geradores de megainundações

É amplamente aceito que megainundações são um fato geológico, e que extravasamentos de grandes corpos d'água represados produzem inundações extremamente volumosas e geomorficamente impactantes que moldam a paisagem. Mas por que esse represamento natural ocorre? Existem dois mecanismos mais importantes: (a) vales fluviais que são bloqueados por gelo, deslizamentos de terra ou materiais vulcânicos; e (b) bacias fechadas, como depressões tectônicas e caldeiras, e aquelas cercadas por geleiras e *morainas*. Em alguns ambientes, as inundações se originam de fontes subglaciais e subterrâneas (*e.g.*, Korup & Tweed, 2007; O'Connor *et al.*, 2013).

2.3.2.1 Colapso da barragem de gelo

Este é aparentemente o evento ou mecanismo gerador mais comum de megainundações: represas formadas por gelo glacial podem bloquear um vale fluvial e formar um lago glacial atrás dele, semelhante a uma represa de concreto moderna formando um reservatório de água. Esses lagos glaciais podem ser enormes e, quando o gelo da represa começa a derreter, a represa de gelo colapsa quase instantaneamente e um enorme volume de água liberada do lago glacial jorra pelo vale e pela planície fluvial, estrondeando pela paisagem com uma energia erosiva catastrófica.

Este tipo de inundação inclui as famosas inundações de 17 milhões de m^3/s do Lago Missoula no Pleistoceno, estudadas pelo mencionado Harlen Bretz há quase um século. Mas hoje em dia, uma infinidade de inundações com magnitude semelhante é conhecida.

As Montanhas Altai na Rússia registram a evidência de um dos maiores eventos catastróficos de lagos periglaciais conhecidos na história geológica da Terra (com descargas superiores a 1 Sverdrup), quando as barragens de gelo dos lagos tornaram-se instáveis e colapsaram (Rudoy, 2002). Grandes terraços catafluviais, predominantemente compostos de cascalho com vários horizontes de grandes

matacões e blocos nos vales dos rios Chuya e Katun foram alvos de datação por radionuclídeos cosmogênicos, e o resultado sugere uma idade pós-LGM[4] (há cerca de 13 mil anos atrás) (Rudoy, 2002). De uma camada de areia no topo dos depósitos catafluviais, duas idades de ~85-90 mil anos foram obtidas de feldspatos, indicando uma idade pré-LGM (Svistunov *et al*., 2022). Eventos semelhantes de colapso de barragem de gelo ocorreram no Lago Darkhat (oeste da Mongólia) durante o Pleistoceno Superior (Rudoy, 1998).

Outro exemplo bem documentado é a megainundação do Rio Fraser na Colúmbia Britânica, onde no final do Pleistoceno um lago represado por geleira subitamente drenou para o sul ao longo do vale do Rio Fraser. A água da inundação percorreu 330 quilômetros pelo vale até Hope, Colúmbia Britânica, e de lá para o oeste até o Mar Salish perto de Vancouver. A enchente foi causada pelo colapso de uma barragem de gelo formada pelo término de geleiras fluindo da Cadeia Costeira Central através do Planalto Interior da Colúmbia Britânica (Clague *et al*., 2021). As evidências incluem enormes barras de cascalho contendo clastos descomunais, dunas de cascalho espalhadas e lençóis de cascalho muito mal selecionados.

Megainundações relatadas devido a extravasamentos de lagos represados por geleiras do Quaternário Superior ocorreram na região do Rio Yarlung Tsangpo, no leste do Himalaia. Foi descoberto que um evento de megainundação ocorreu em ~5 mil anos, com uma vazão mínima de ~1,1-4,4×106 m³/s (Wang *et al*., 2024).

Inundações menores ocorreram historicamente, como o evento recente ocorrido em 1986, quando a Geleira Hubbard no sudeste do Alasca fechou a foz do Fiorde Russell, criando o "Lago Russell". Quando o lago rompeu a barragem de gelo dias depois, a subsequente inundação glacial, com um fluxo de 105.000 m³/s, tornou-se a maior inundação desse tipo na história registrada.

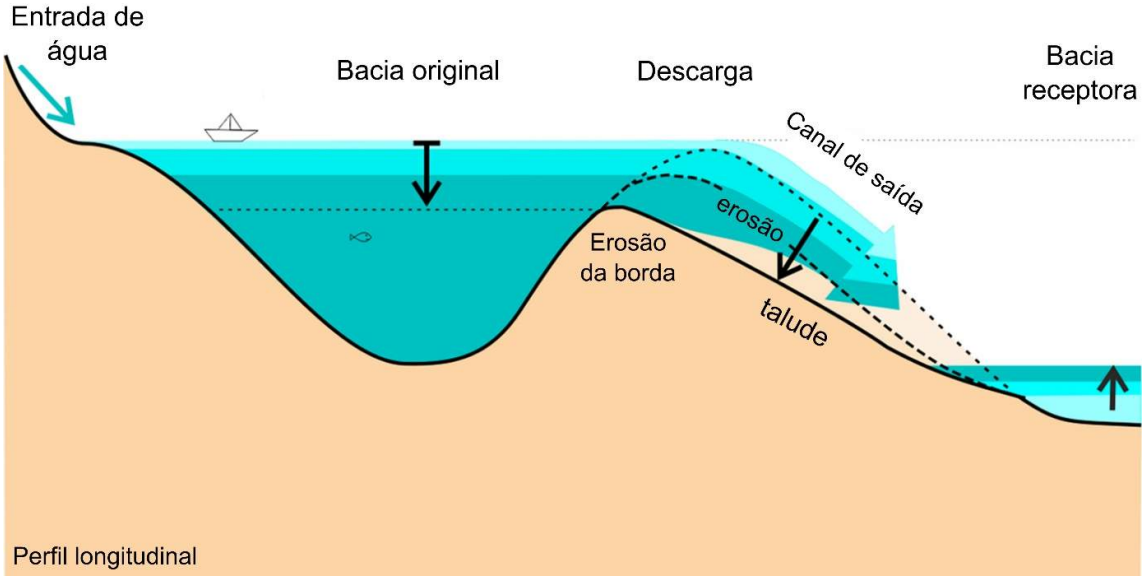
Resumindo todas as informações, a conclusão é que as maiores paleoinundações da Terra, com descargas da ordem de 106-107 m³/s, estão associadas à glaciação (Baker, 1996, 2009; O'Connor & Costa, 2004). O principal mecanismo gerador que produziu esses eventos de megainundação é a liberação repentina de água de lagos glaciais formados a partir do represamento pela geleira de vales fluviais pré-existentes.

[4] Último Máximo Glacial (entre 21 e 27 mil anos atrás).

2.3.2.2 Ruptura da bacia pela erosão da borda

De acordo com O'Connor & Costa (2004), o enchimento e o transbordamento de grandes bacias fechadas também podem causar imensas inundações, porque durante períodos mais úmidos, bacias hidrologicamente fechadas podem encher. Uma vez que um lago em elevação ultrapassa a borda de sua bacia, o transbordamento pode causar erosão rápida, resultando na liberação de um grande volume de água na planície de inundação adjacente (Fig. 9). Um exemplo documentado é a inundação Bonneville, que entrou no sistema do Rio Columbia pelo sudeste do Lago Pluvial Bonneville, o maior lago do Pleistoceno no oeste da América do Norte que cobria grande parte do atual Utah (EUA). Cerca de 14.500 anos atrás, quase 5.000 km³ de água extravasaram da bacia para a drenagem adjacente. Com uma descarga máxima de cerca de 1 milhão de m³/s, o fluxo encheu um *canyon* adjacente e transbordou, arrancando solo de uma faixa de terra de 5 quilômetros de largura e esculpindo imensas cataratas onde o fluxo reentrou no *canyon*. O evento está bem documentado na literatura (*e.g.*, O'Connor, 1993; Abril-Hernandez *et al.*, 2018).

Figura 9 – Modelo conceitual de transbordamento de lago e inundação catastrófica.

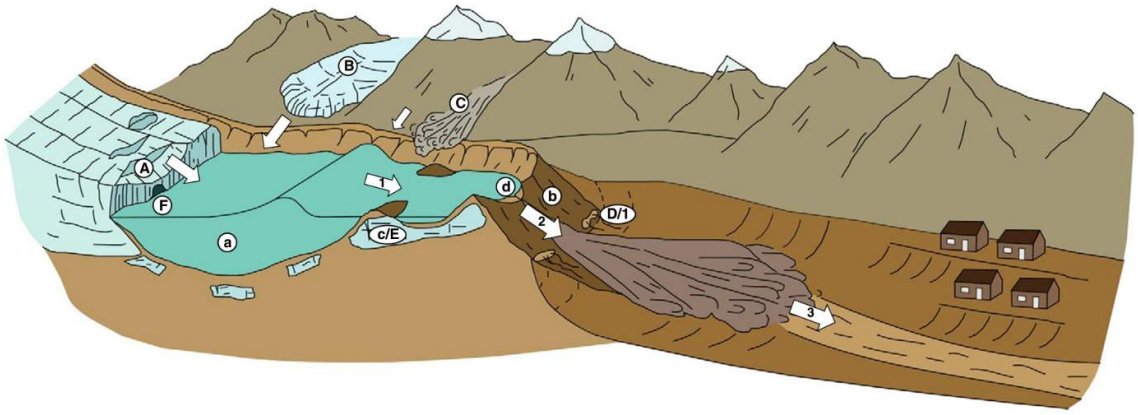


Isso é resultado da interação entre a erosão da borda da bacia, da descarga de água e da redução do nível do lago. Fonte: modificado de Garcia-Castellanos & O'Connor (2018).

Esse tipo de mecanismo também ocorre em lagos glaciais represados por uma barragem de *moraina* (Fig. 10). Os mecanismos geradores envolvem avalanches

de gelo e/ou rochas, entrada de água de degelo (*e.g.*, pela liberação de um reservatório subglacial), precipitação intensa, degelo causado por elevação na temperatura e terremotos (Westoby *et al*., 2014). A entrada repentina de grandes volumes de materiais resulta no deslocamento da água do lago e o subsequente transbordamento sobre a estrutura da barragem, iniciando a formação de uma ruptura. Essa ruptura evolui com a erosão progressiva e o alargamento de um canal de escoamento no talude da barragem e, eventualmente, a água é liberada catastroficamente pelo canal recém-formado (Westoby *et al*., 2014).

Figura 10 – Esquema de um lago glacial represado por uma barragem de moraina.



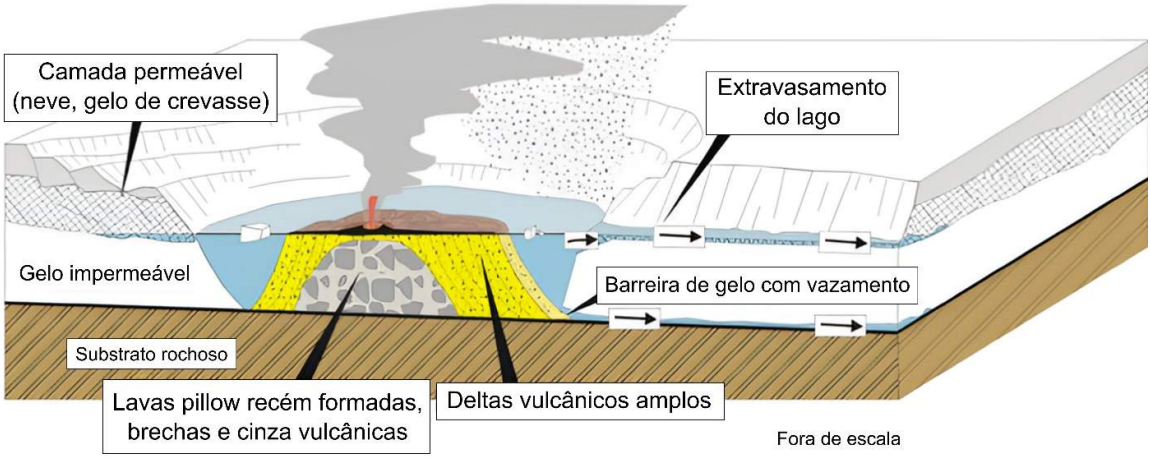
(A) Desprendimento da geleira. (B) Entrada de gelo. (C) Avalanches. (D) Assentamento da barragem. (E) Degradação de um núcleo de gelo da moraina. (F) Entrada de água de fontes supra ou subglaciais. (a) Volume do lago. (b) Razão largura-altura da barragem. (c) Degradação de gelo em subsolo. (d) Borda da barragem limitada. (1) Propagação do deslocamento da água do lago. (2) Início da formação da ruptura. (3) Propagação da inundação resultante pelo vale. Fonte: modificado de Westoby *et al*. (2014).

2.3.2.3 Vulcanismo subglacial

Um dos gatilhos de uma megainundação pode ser a erupção de um vulcão situado abaixo de uma geleira ou vale glacial. A erupção subglacial pode ser explosiva ou não-explosiva e envolve a geração de água líquida (Smellie, 2000) (Fig. 11). O calor liberado derrete o gelo sobrejacente ou enfraquece uma represa feita de sedimentos de *moraina* glacial, levando a uma remoção repentina da represa do lago e a consequente liberação de enormes volumes de água. O vulcanismo subglacial foi direta ou indiretamente responsável por 5 das 27 maiores inundações quaternárias, conforme documentado por O'Connor *et al*. (2004, 2013). Um exemplo histórico é a erupção vulcânica subglacial de 1918 em Katla, Islândia, causando um fluxo de cerca

de 300.000 m³/s. Também na Islândia, uma inundação de 700.000-1.000.000 m³/s causada por uma erupção subglacial na localidade de Jökulsá ocorreu há cerca de 7.000 anos. Um evento muito recente é o *jökulhlaup* de novembro de 1996 na região da Geleira Skeidarár, onde vibrações constantes do solo sinalizaram o movimento do gelo para o vulcanismo, resultando na liberação de 3,6 km³ de água descarregada da geleira, carregada de sedimentos e transportando enormes blocos de gelo quebrado. Sedimentos de até 9 metros de espessura foram depositados em uma área de 500 km² (Worseley, 1997).

Figura 11 – Vulcanismo subglacial como mecanismo de inundação catastrófica.



O calor liberado pelas erupções provoca o derretimento do gelo, originando um lago glacial represado pela geleira. A água então começa a escoar através das barragens de gelo e pode, eventualmente, evoluir para uma inundação de grandes proporções. Fonte: modificado de Smellie (2020).

2.3.2.4 Inundações causadas por deslizamentos

Inundações de lagos represados por deslizamentos de terra são desastres naturais comuns em regiões de alta montanha, como por exemplo o Planalto Tibetano Oriental no sudoeste da China, onde a ruptura da barragem gera megainundações que formam depósitos catastróficos e podem ameaçar tanto a população quanto a infraestrutura local (*e.g.*, Ma *et al*., 2024).

As barragens de deslizamentos de terra podem se formar em uma ampla gama de cenários fisiográficos, desde avalanches de detritos alpinos altos até rupturas *quick-clay* em fundos amplos de vales. Os mecanismos mais comuns que desencadeiam deslizamentos de terra formadores de barragens são tempestades, derretimento rápido de neve e, mais frequentemente, terremotos. Um bom exemplo é

a enchente de 1841 do Rio Indo, com uma vazão máxima de cerca de 540.000 m³/s, resultante da ruptura do deslizamento de rochas que bloqueou temporariamente o rio no oeste do Himalaia, no Paquistão.

Dai *et al*. (2005) relatam que documentos históricos chineses registraram que em 1º de junho de 1786, um forte terremoto de M=7,75 ocorreu na área de Kangding-Luding, Sichuan, sudoeste da China, resultando em um grande deslizamento de terra que invadiu o leito do Rio Dadu. Como resultado, uma barragem de deslizamento de terra bloqueou o rio. Dez dias depois, a ruptura repentina da barragem resultou em uma inundação catastrófica a jusante.

2.3.2.5 Inundações glaciares

Um bloqueio de gelo é formado quando blocos e camadas de gelo flutuante do rio se acumulam em uma margem ou um canal se curva e impede o progresso posterior a jusante. Esses bloqueios de gelo podem reduzir significativamente o fluxo de um rio e causar inundações significativas a montante, formando o que eventualmente é chamado de barragem de gelo. Dependendo do tamanho da estrutura de gelo e do corpo d'água alagado atrás dela, uma megainundação pode resultar da liberação repentina de água quando as barragens de gelo se rompem. Esse foi o caso em abril de 1952 no Rio Missouri, Dakota do Norte, onde uma barragem de gelo em erosão resultou em um aumento do fluxo de cerca de 2.100 m³/s para mais de 14.000 m³/s em menos de 24 horas (O'Connor & Costa, 2004).

Inundações extremas de bloqueio de gelo são mais comuns em sistemas fluviais continentais de alta latitude e fluxo para o Norte, como o Rio Lena e grandes sistemas fluviais adjacentes do norte da Eurásia e o Rio Mackenzie na América do Norte. Grandes rios que correm em direção aos polos são especialmente suscetíveis a grandes inundações porque as áreas de cabeceira podem derreter antes das áreas a jusante, aumentando o potencial de grandes bloqueios.

2.3.2.6 Tectônica e eustasia

Este é um tipo muito diferente de categoria, envolvendo fatores alocíclicos em escala global. O melhor exemplo para este tipo de megainundação é provavelmente o evento conhecido como megainundação de Zanclean. Este evento está ligado à Crise de Salinidade Messiniana (MSC), um evento paleoceanográfico caracterizado

por uma dessecação parcial do Mar Mediterrâneo de 5,97 a 5,33 Ma. A causa foi uma restrição temporária da via marítima Atlântico-Mediterrâneo, transformando o Mar Mediterrâneo em um lago hipersalino gigante. Uma megainundação fluindo do oeste para o leste do Mar Mediterrâneo através de uma passagem de entrada sudeste da Sicília foi considerada um cenário plausível para o término da MSC. A megainundação de Zanclean foi provavelmente maior do que as maiores inundações terrestres conhecidas, como Missoula, Bonneville e Altai (Micallef *et al*., 2018). O mecanismo gerador ainda está em debate. Falhas na região de Gibraltar e rápida elevação do nível do mar são consideradas (Loget & Driessche, 2006).

2.3.2.7 Megainundações terrestres: resumo e conclusão

Uma visão geral do que foi discutido acima, resumindo as condições para a ocorrência de megainundações, é apresentada aqui. A primeira e essencial condição, evidentemente, é a presença de água em estado líquido, contida em um corpo de água com volume excepcional.

As megainundações são uma realidade no registro geológico, registradas por sedimentos específicos como clastos gigantes e descomunais, mega ondulações de cascalho, entre outros, e têm os mais variados mecanismos de desencadeamento. De fato, apenas uma pequena parte das megainundações se origina de condições climáticas extremas; a maioria absoluta e significativa delas tem sua origem ligada a grandes lagos formados por algum tipo de represamento natural. Para os casos bem estudados de megainundações do período Quaternário, por exemplo, o número de eventos ligados ao represamento e posterior rompimento é de cerca de 85%, conforme documentado por O'Connor & Costa (2004).

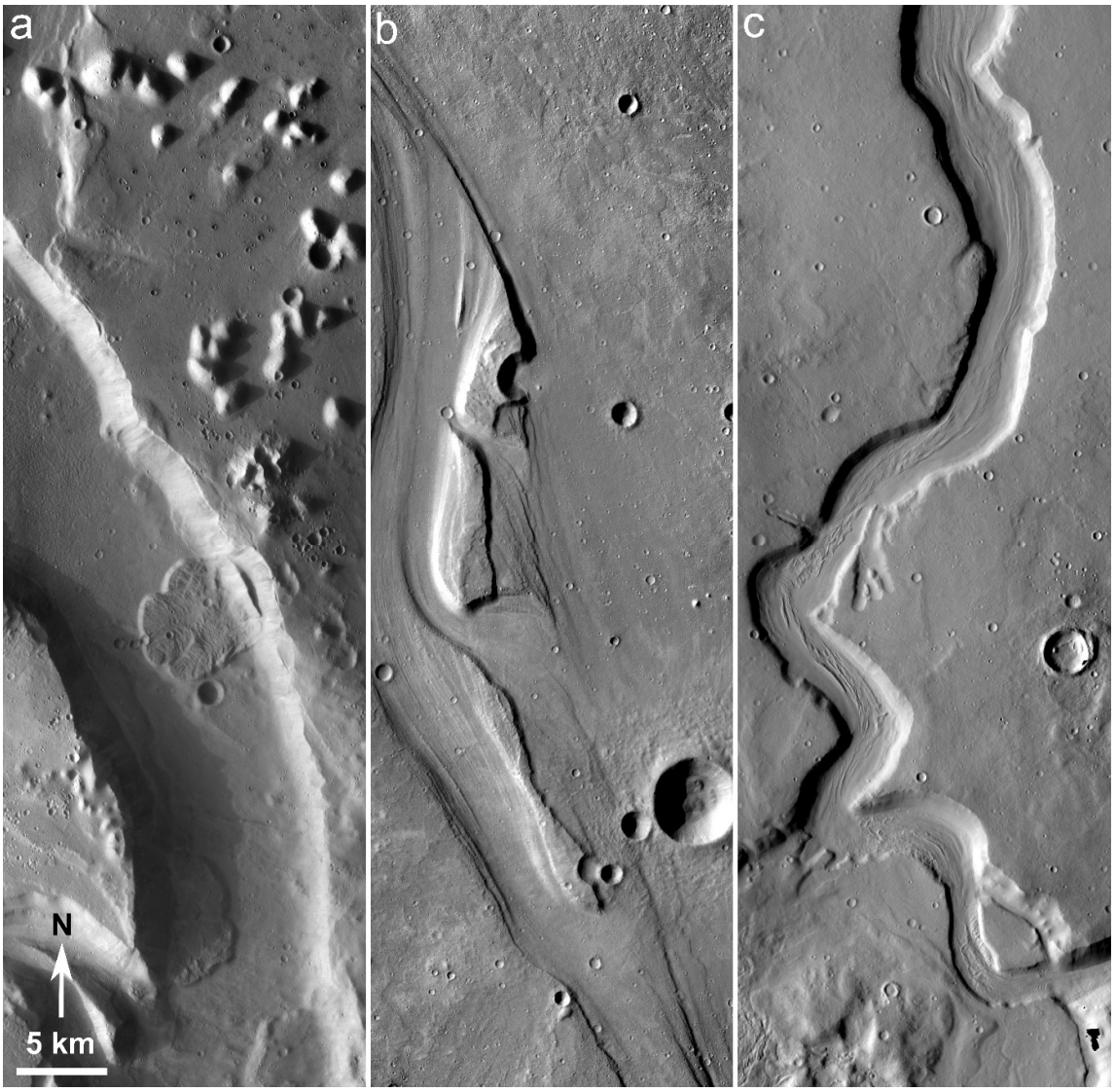
O represamento natural pode ser por geleiras ou seus derivados, o chamado *ice-jam*; ou por bloqueios causados por grandes deslizamentos de terra e geologicamente instantâneos, particularmente em áreas montanhosas sujeitas a terremotos. A estrutura de represa colapsa quando algum evento natural a afeta; que pode ser variação climática regional, atividade vulcânica e terremotos. O modo como todo esse contexto é transferido para Marte será discutido a seguir.

2.3.3 O registro geológico de inundações catastróficas em Marte

2.3.3.1 Canais de escoamento

A superfície de Marte é amplamente marcada por canais e vales alongados, baixos e largos, cercados por topografia elevada (Fig. 12). Os canais marcianos demonstram evidências claras de fluxos de água em larga escala não apenas dentro deles, mas também em suas margens (Baker *et al*., 2015).

Figura 12 – Três diferentes canais de megafluxo subaquoso em Marte.



(a) Canal de escoamento da cratera Masursky (15°N/35°W). (b) A junção dos canais Shalbatana e Simud Vallis (15°N/40°W). (c) Mamers Valles (31°N/19°E). Fonte: THEMIS, NASA/JPL-Caltech/ASU.

Entre essas evidências estão feições de inundação, como barras pendentes e de expansão, formas de linhas de corrente e redes de vales, cuja origem é comumente atribuída ao escoamento superficial e à erupção de águas subterrâneas (*e.g.*, Harrison & Grimm, 2005).

Baker & Milton (1974), em seu trabalho sobre a erosão causada por inundações catastróficas, analisaram os maiores e mais conhecidos canais em Marte, entre os quais estão Ares e Kasei Valles. Esses canais foram considerados como fortes evidências da presença de água líquida em Marte. De acordo com os autores, esses canais foram esculpidos por megainundações, comparáveis às inundações do Pleistoceno na Terra. Ares Vallis, por exemplo, tem 25 quilômetros de largura em seu setor mais estreito (*upper reach*) e cerca de 100 quilômetros de largura em seu setor terminal (*lower reach*). No *upper reach*, o canal é mais profundo, atingindo 1500 metros de profundidade, e é 200 metros mais raso no *lower reach* (Pacifici *et al*., 2009). Da mesma forma, Harrison & Grimm (2005) afirmam que o papel da erosão ligada ao escoamento superficial é comparável à morfologia de vales na Terra.

Trabalhos posteriores apontaram outros mecanismos capazes de criar vales e canais marcianos, como falhas, erosão glacial ou fluxos de lava (*e.g.*, Tanaka, 1986; Robinson & Tanaka, 1990) ou mesmo fluxos de detritos submarinos e correntes de turbidez (*e.g.*, Komar, 1983; Burr, 2011). No entanto, mais recentemente, a grande maioria dos pesquisadores concorda que esses canais foram criados pela liberação catastrófica de enormes quantidades de água líquida subterrânea, seguida por escoamento superficial e erosão (*e.g.*, Wilson *et al*., 2004; Harrison & Grimm, 2005; Wang *et al*., 2005; Harrison & Chapman, 2010; Carr & Head, 2010; Andrews-Hanna & Lewis, 2011; Baker *et al*., 2015; Lapotre *et al*., 2016). Impactos meteoríticos parecem ter sido o provável mecanismo inicial que provocou as erupções de águas subterrâneas (Wang *et al*., 2005), enquanto alguns sugerem mecanismos diferentes, como vulcanismo subglacial (Baker *et al*., 2015) ou atividade geotérmica (Turbet *et al*., 2017).

Wang *et al*. (2005), por exemplo, estudaram as inundações em Marte como consequência da liberação de águas subterrâneas causadas por impactos. Em seu estudo, os autores investigam a liquefação produzida pelo impacto meteorítico e argumentam que Marte poderia ter tido um aquífero confinado de tamanho global (hidrosfera) sob uma camada de gelo (criosfera) em sua superfície (também sustentado por Rodriguez *et al*., 2015). De acordo com os autores mencionados, solos

saturados em Marte poderiam ter sido consolidados em condições de não-drenagem e isso pode ter levado ao acúmulo de pressão de poros e liquefação. Eles argumentam que a liquefação ocorre quando o solo sofre forte tremor. Os autores também sugerem que a liquefação tem a capacidade de liberar água para longe da cratera, de modo que os impactos que criaram crateras de 100 quilômetros ou mais de diâmetro podem ser a causa da liquefação global e do fluxo de água. Cada uma dessas crateras em particular pode ter liberado volumes de 10^4 km³ de água subterrânea de um aquífero conectado globalmente. Rodriguez *et al*. (2015) argumentam que zonas de pressão superlitostática na crosta de Marte podem ter contribuído para a liberação e subsequente escoamento da água do aquífero confinado na criosfera, mas não eram uniformes em todo o planeta. Esses autores propõem uma migração de água subterrânea através de estruturas permeáveis, incluindo sistemas de cavernas interconectadas cheias de água líquida. Então, uma carga hidráulica elevada teria impulsionado as erupções da região de Valles Marineris.

Baker *et al*. (2015) levantam o fato de que a hipótese do aquífero global tem muitas dificuldades. Eles argumentam que o fluxo de água subterrânea através de meios porosos é inadequado para gerar as grandes descargas que formaram os maiores canais de escoamento. Eles sugerem, então, a existência de enormes cavidades subterrâneas que teriam atuado como condutos para o fluxo de águas subterrâneas, que teriam sido maiores do que o proposto na hipótese do aquífero confinado. Os mesmos autores afirmam que alguns dos canais de inundação catastrófica estão associados a fissuras relacionadas a erupções de lava e água pressurizada. Essas fissuras teriam servido como condutos para magmas ascendentes abaixo da criosfera, levando ao derretimento do gelo e, então, seu extravasamento como megainundações.

Wilson *et al*. (2004) apontaram que o padrão de drenagem de água em Marte mostra uma diminuição na descarga com o tempo, uma vez que o gradiente de pressão que conduz o fluxo de água diminui. Andrews-Hanna & Lewis (2011) mencionam que o lençol freático permaneceu na superfície marciana ou abaixo dela, assumindo que as águas subterrâneas evaporam ao atingir a superfície do planeta. Em muitos baixos topográficos, a descarga teria ocorrido onde o lençol freático intersectou a superfície (Harrison & Grimm, 2005). No entanto, isso não poderia ter liberado as águas subterrâneas catastroficamente. Em um trabalho mais recente, Palumbo & Head (2020) sugerem que as águas subterrâneas foram liberadas em

Marte de forma semelhante a um lago alimentado por águas subterrâneas na Terra, o que requer um clima quente e água suficiente no subsolo. Os autores concluem que as temperaturas globais médias semelhantes às da Terra atual teriam sido dominantes no início da história geológica de Marte.

Lapotre *et al*. (2016) desenvolveram uma teoria em que a formação de *canyons* esculpidos no leito rochoso marciano foi devido à convergência do fluxo de grandes megainundações criando cachoeiras. Eles previram a duração das inundações como sendo da ordem de alguns meses, em vez de menos de um dia (conforme estimado por trabalhos anteriores). Eles sugerem que a largura do *canyon* é controlada principalmente pela descarga de inundação.

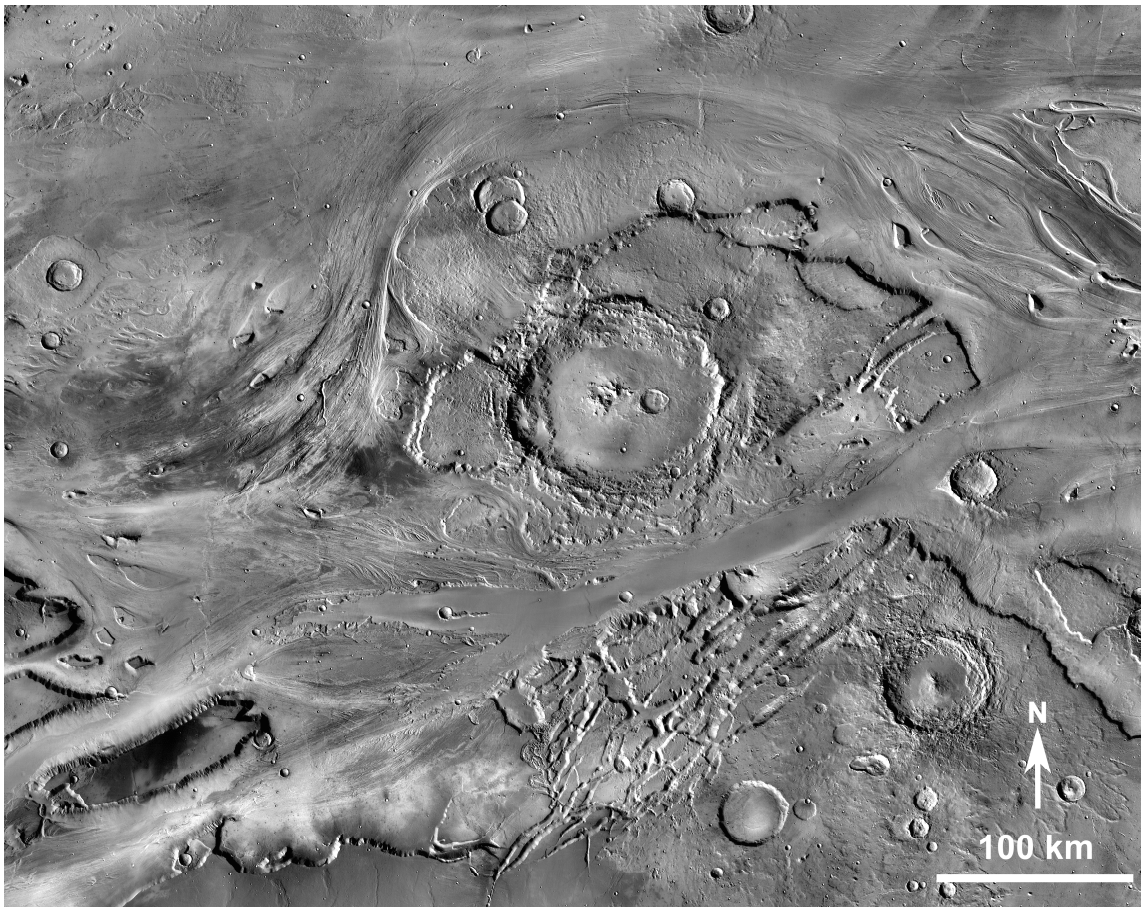
O canal de escoamento Kasei Valles (Fig. 13) tem muitos *canyons* (região de Echus Chasma) que foram esculpidos em rochas vulcânicas do período Hesperiano (Lapotre *et al*., 2016). Uma fonte quente de água líquida pode ter sido catastroficamente liberada por impactos na região de Echus Chasma, levando ao fluxo de água que criou Kasei Valles (Turbet *et al*., 2017). Estruturas tectônicas, como grábens, podem ter contribuído para o aquecimento geotérmico da fonte de água, o que aparentemente ocorreu em Phlegra Montes (Gallagher *et al*., 2021). Além disso, a erosão de cataratas parece ter ocorrido na mesma região de Echus Chasma, simultaneamente com a erupção de águas subterrâneas (Harrison & Grimm, 2005). Outra visão é que a água foi represada ou barrada, coletada pela drenagem do sistema aquífero na região norte de Valles Marineris (Robinson & Tanaka, 1990).

O canal de escoamento Ares Vallis (Fig. 14), por sua vez, esculpiu cataratas, onde vários depósitos de cascalho podem ser observados a jusante das cataratas (Lapotre *et al*., 2016). Feições de inundação catastrófica, conforme descrito por Pacifici *et al*. (2009), incluem terrenos sulcados, terrenos elevados alinhados à corrente, barras gigantes, barras pendentes e cataratas. Eles também compararam as principais feições catastróficas com as inundações Missoula na América do Norte, que demonstraram muitas semelhanças. No entanto, de acordo com os autores, as feições de megainundações em Ares Vallis estão associadas a terrenos sulcados, terrenos elevados alinhados à corrente e barras pendentes, e não há grandes depressões na base das cataratas.

É importante mencionar novamente que, assim como para as *Channeled Scablands*, os canais de escoamento em Marte parecem ter sido formados não apenas por uma única megainundação, mas por inúmeras inundações (Baker *et al*.,

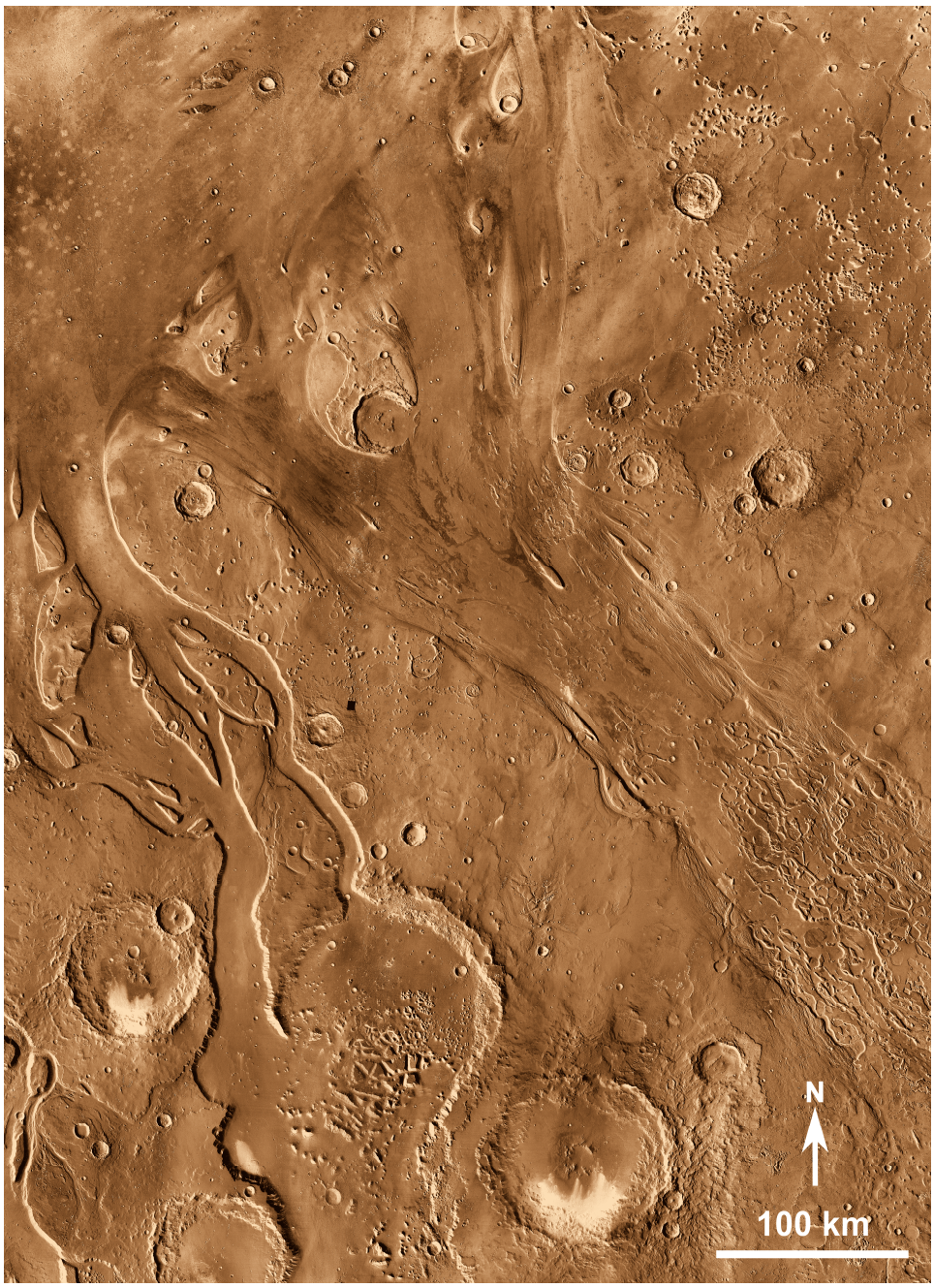
2015) que conduziram os imensos volumes de água do subsolo (Harrison & Grimm, 2008). Durante a formação de Ares Vallis, pelo menos seis eventos de inundação ocorreram (Pacifici *et al*., 2009.), com base em análise geomorfológica de imagens de alta resolução. Em Kasei Valles, alguns reconhecem um grande evento de inundação, responsável pela intensa erosão de seu leito (*e.g*., Robinson & Tanaka, 1990; Turbet *et al*., 2017). Apesar disso, pode-se argumentar que, assim como em Ares Vallis, vários eventos de inundação esculpiram os canais de escoamento de Kasei Valles, levando em conta a formação sucessiva de feições erosivas e deposicionais e do regolito (Wang *et al*., 2005).

Figura 13 – A seção norte do canal de escoamento Kasei Valles, Marte.



Esta é a seção mais larga de Kasei Valles (26°N/58°W). É possível visualizar, no centro da imagem, um canal de paleofluxo subaquoso mais estreito, enquanto outros canais foram desviados por grandes obstáculos topográficos do substrato. Fonte: THEMIS, NASA/JPL-Caltech/ASU.

Figura 14 – A desembocadura do canal de escoamento Ares Vallis, Marte.



Esta região (15°N/31°W) mostra evidências de paleofluxo subaquoso e descarga em planícies (canto superior esquerdo). Fonte: THEMIS, NASA/JPL-Caltech/ASU.

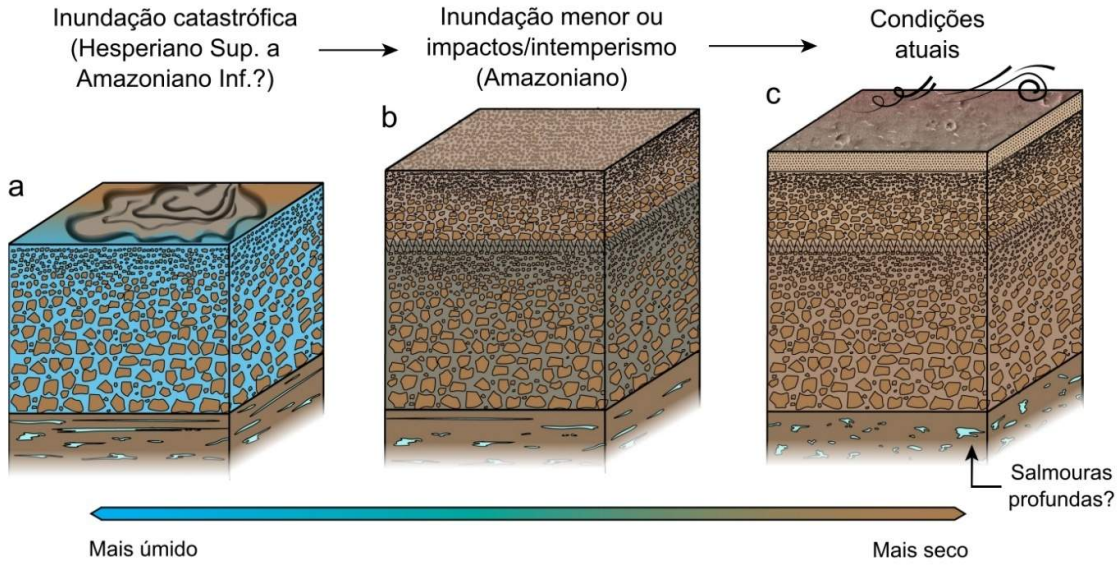
2.3.3.2 O paleoceano

Parker *et al*. (2010) afirmam que um oceano primitivo situado nas planícies do Hemisfério Norte de Marte pode ter existido, levando em conta níveis diferentes (*e.g.*, Deuteronilus, Ismenius, Arabia e Acidalia) de linhas de costa. Esses níveis

corresponderiam a interrupções de um espesso oceano coberto por detritos e gelo. Quando o oceano recuou até aproximadamente o Nível Deuteronilus, as inundações nas planícies do Norte desencadearam uma pequena transgressão, cujos efeitos incluem a formação de frentes de fluxo lobadas e os montes no Nível Deuteronilus.

Dados coletados pelo radar da sonda *Zhurong* nos depósitos sedimentares de Utopia Planitia, no Hemisfério Norte, mostraram que há camadas horizontais com clastos maiores na base e menores acima. Conforme o trabalho de Li *et al*. (2022), essas camadas foram reconhecidas a até 100 metros de profundidade (ondas de baixa frequência). A camada mais profunda é, provavelmente, o resultado de uma inundação catastrófica que transportou sedimentos para a bacia oceânica durante o Hesperiano. A camada mais recente, por sua vez, pode ter sido criada por outra inundação menor há cerca de 1,6 Ga, durante o Amazoniano (Fig. 15).

Figura 15 – Modelo evolutivo de duas megainundações em Utopia Planitia, Marte.



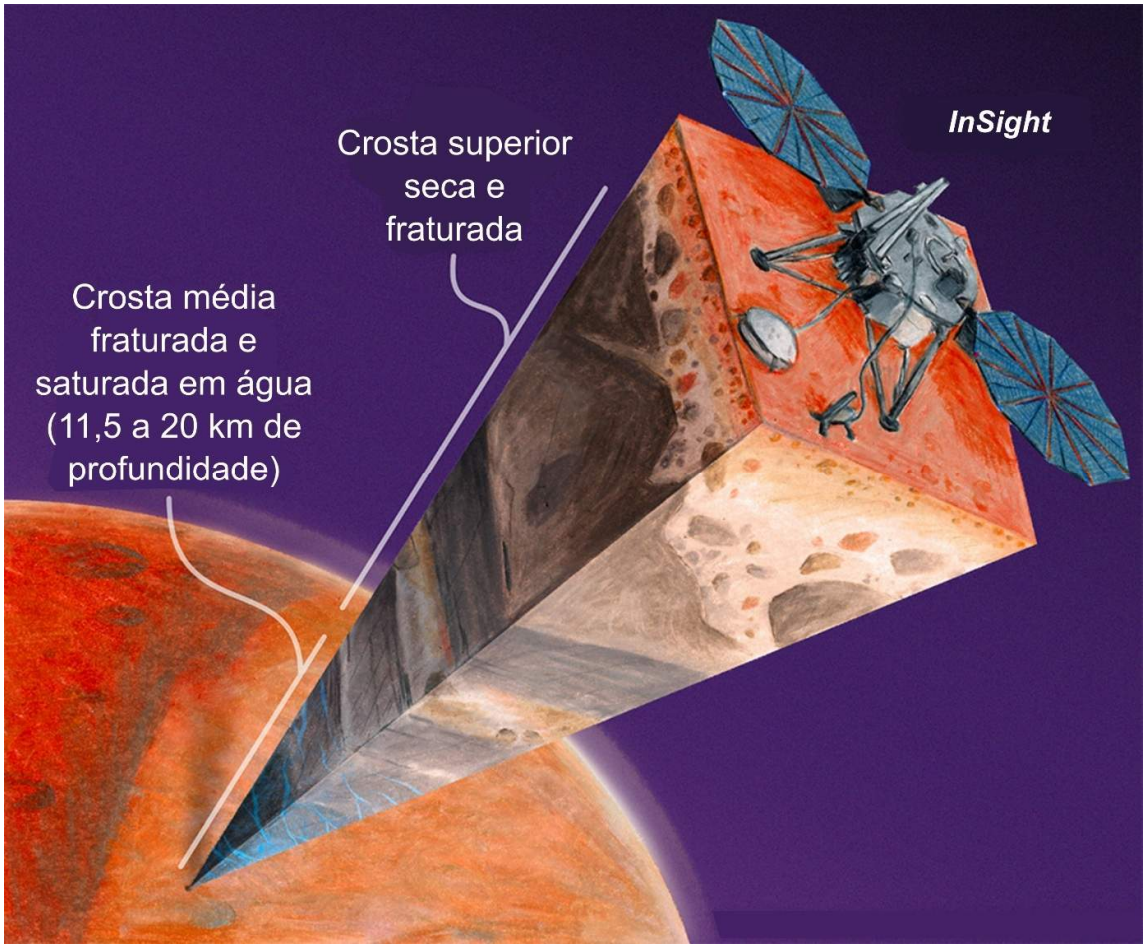
(a) A inundação mais antiga deixou depósitos com gradação normal. (b) Uma inundação posterior cobriu os depósitos mais antigos. (c) A estratificação resultante observada atualmente. Fonte: modificado de Li *et al*. (2022).

2.3.3.3 Água líquida: descobertas recentes

Recentemente, Wright *et al*. (2024) apresentaram uma descoberta muito importante sobre a existência de água em Marte. De acordo com os autores, grandes volumes de água líquida existiam na superfície de Marte de forma transitória. Eles usaram modelos físicos para identificar combinações de litologia, saturação de água,

porosidade e formato de poro com velocidades sísmicas e gravidade e descobriram que a crosta média de Marte está saturada com água líquida. Esses autores alegaram que as rochas ígneas da crosta média (20 quilômetros abaixo da região de Elysium Planitia) contêm fraturas finas preenchidas com água líquida (Fig. 16), o que explica melhor os dados geofísicos coletados pela sonda *InSight*. Além disso, a espessura do reservatório de água é de cerca de 1 a 2 quilômetros em uma crosta porosa de 10 quilômetros de espessura, o que representa mais do que a capacidade proposta para o antigo oceano marciano. Esta é uma descoberta notável que prova que a água líquida existiu e ainda existe no subsolo de Marte. Isso também prova que a água primordial no planeta não foi totalmente perdida para o espaço.

Figura 16 – Representação artística da crosta média marciana saturada em água.



Os dados foram coletados pela sonda *InSight* na região de Elysium Planitia, no Hemisfério Norte de Marte. Fonte: modificado de Keane & Rodriguez (2024) e baseado em Wright *et al*. (2024).

Os resultados publicados por Moreland *et al*. (2025), utilizando dados da sonda *Curiosity* na cratera Gale, mostram que um lago pequeno de 10 metros de profundidade com aproximadamente 50 milímetros de entrada de água mensal e uma cobertura de gelo sazonal poderiam reter água líquida sazonal por mais de 100 anos, demonstrando condições próximas de lagos terrestres de longa duração. O “Modelo de Lago em Marte para Simulações e Reconstruções Atmosféricas” (Fig. 17) destes autores pode ajudar a definir as condições paleoambientais que favoreciam água superficial de longa duração.

Figura 17 – Modelo de Lago em Marte para Simulações e Reconstruções Atmosféricas.



As variáveis desse modelo incluem humidade, temperatura do ar, radiação descendente, pressão, velocidade do vento, salinidade do lago, profundidade inicial do lago e área da superfície do lago. Fonte: modificado de Moreland *et al*. (2025).

Além do trabalho de Moreland *et al*., Mondro *et al*. (2025) mostram que os dados fornecidos pela sonda *Curiosity* também revelam que antigos lagos existiram sem uma cobertura de gelo (Fig. 18). *Ripples* de onda simétricas na cratera Gale atestam que as condições climáticas primitivas sustentaram água líquida livre de gelo na superfície de Marte, durante a época de formação das *ripples*. A laminação interna e a morfologia das *ripples* mostram uma arquitetura comum em ambientes subaquosos dominados por ondas.

A existência de lagos, deltas e possivelmente um oceano é em parte comprovada por canais amplamente encontrados na superfície de Marte; vastos reservatórios de água subterrânea também foram reconhecidos (Cabrol & Grin, 2010). O elo que conecta a água subterrânea à formação dos lagos de cratera é, em última análise, o capítulo perdido na história hidrológica do planeta vermelho.

Marte é o planeta mais similar à Terra e pode conter a resposta sobre como a vida se originou. Nesse e em vários sentidos, Marte é “o guardião do nosso passado” (Cabrol & Grin, 2010).

Figura 18 – Concepção realista de um lago na cratera Jezero, Marte.



A cratera Jezero está localizada a 18°N/77°E, com 45 km de diâmetro. Fonte: NASA/JPL-Caltech/ASU.

2.3.4 Condições geológicas que induzem os mecanismos geradores

Os seis mecanismos apresentados e discutidos anteriormente são essencialmente induzidos por condições geográficas/geológicas que envolvem tanto processos exogênicos quanto endogênicos. As condições são: (i) presença de geleiras; (ii) períodos de aquecimento climático e chuvas intensas; (iii) atividade vulcânica; e (iv) atividade tectônica e sísmica. É necessário discutir a possibilidade de que algumas dessas condições ambientais estavam presentes em Marte como mecanismos geradores de megainundações.

2.3.4.1 Presença de geleiras

Está claro que o gelo desempenhou um papel proeminente na superfície de Marte durante o final do Hesperiano e início do Amazoniano. Como salientado por Baker *et al*. (2015) e Rodriguez *et al*. (2015), um dos mecanismos mais recorrentes na liberação catastrófica de água foi o vulcanismo subglacial associado a uma crosta já saturada em água (mais tarde comprovado pelo trabalho de Wright *et al*., 2024). Como proposto por Rodriguez *et al*. (2015), sedimentos fluviais e glaciais teriam recoberto vales e *canyons* nos planaltos marcianos, armazenando corpos d'água nas profundezas dos *canyons*. A água então teria sido liberada repentinamente como resultado de pressões superlitostáticas criadas pela deformação das rochas supracrustais.

Palumbo & Head (2020) sugerem que esse processo de liberação de água subterrânea em Marte envolveu a formação de lagos superficiais similares a lagos alimentados por água subterrânea na Terra. Em Marte, muitos desses paleolagos teriam sido cobertos por gelo, levando em conta as latitudes e o resfriamento global que o planeta enfrentou. Por exemplo, as crateras da região norte de Arabia Terra (em torno de 45°N e 20°E), como a Ismenius Cavus, teriam abrigado lagos fechados durante aquele período (Fig. 18). Geleiras teriam se desenvolvido (*e.g*., Turbet *et al*., 2017), até tornarem-se instáveis e colapsarem, formando os canais de escoamento.

2.3.4.2 Períodos de aquecimento climático e chuvas intensas

Turbet *et al*. (2017) apontam para o fato de que eventos de impactos poderiam ter provocado o derretimento de gelo acumulado nas regiões onde vales e canyons foram escavados. Segura *et al*. (2002) mostram que o aquecimento promovido pelo material ejetado quente de crateras de impacto teriam mobilizado o gelo superficial e chuvas intensas ocorreriam, reabastecendo aquíferos. Os autores sugerem episódios de "chuvas escaldantes" levando a inundações repentinas. Isso pode ter inundado crateras de impacto e mais tarde iniciado eventos de megainundações.

O trabalho de Segura *et al*. (2012) aponta para a existência de um estado de *greenhouse* no qual a maior parte da água está na atmosfera e a temperatura é alta porém estável. O mesmo trabalho mostra que impactos de meteoritos foram capazes de causar precipitação em escala global e aquecimento da superfície. Com o colapso da *greenhouse*, a intensa precipitação global teria ocorrido. Adicionalmente, uma

cobertura de nuvens teria sido produzida em todo o planeta pelas condições quentes e úmidas (Turbet *et al*., 2017). Essa cobertura de nuvens seria responsável por padrões uniformes de precipitação.

2.3.4.3 Atividade vulcânica

Inundações cataclísmicas decorrentes da liberação de enormes fluxo de água por causa de vulcanismo na região do Platô de Tharsis têm sido hipotetizadas (*e.g*., Baker *et al*., 1991; Burr, 2010), e imagens de sonda espacial dos anos 2000 documentam uma fase de inundações repentinas e vulcanismo associado (com extensos derrames de lava) que parecem ter ocorrido nas planícies de Cerberus há pelo menos 10 Ma atrás (Berman & Hartmann, 2002; Burr *et al*., 2002; Baker, 2009).

As regiões de Noctis Labyrinthus e Phoenicis Lacus, localizadas junto ao Platô de Tharsis (em torno do Equador), dão origem ao sistema de *canyons* do Valles Marineris. Aparentemente, essas regiões de substrato fraturado e caótico, outrora cobertas pelo *permafrost* marciano, podem ter sido originadas por erupções de água subterrânea ligada a atividade vulcânica (Wang *et al*., 2005). O mesmo pode ter acontecido no Platô vulcânico de Elysium (a 30°N e 100°E), onde vales esculpidos por megafluxos subaquosos são encontrados, como Granicus e Hebrus Vallis.

2.3.4.4 Atividade tectônica e sísmica

Como argumentado por Golombek & Phillips (2010), Marte enfrentou atividade tectônica ao longo da sua história geológica (com cinco estágios de deformação). Os autores analisaram a carga tectônica sobre o Platô de Tharsis e sugeriram que se a composição da carga vulcânica é basáltica, a água liberada com o magma teria sido equivalente a uma camada global de 100 metros de espessura, favorecendo o clima primitivo quente e úmido do planeta.

Terremotos poderiam ter sido produzidos como resultado de impactos de meteoritos, causando a ruptura do substrato das crateras, onde os terrenos caóticos são encontrados atualmente. Além disso, o bombardeamento pesado teria gerado um esforço na crosta marciana (*e.g*., Watts *et al*., 1975), sendo capaz de produzir uma flexura litosférica em profundidade (discutida na Seção 4 desta pesquisa).

Terremotos também podem ter sido responsáveis por deslizamentos de terra nas crateras e bacias de impacto, feições muito comuns em Marte. Esse processo

pode ter contribuido para a ruptura da borda de crateras que abrigavam lagos, levando a eventos de megainundação.

2.4 SÍNTESE CONCLUSIVA E IMPLICAÇÕES

Quando emergiu como ciência no despontar do século XIX, a geologia era fortemente alicerçada no uniformitarismo de Charles Lyell e seu "*Principles of Geology*" publicado nos anos 1830. Embora historicamente invalidável, a visão uniformitarista de Lyell resultou em um viés epistemológico em favor de processos geológicos "diários" e, consequentemente, contra hipóteses que invocavam eventos geológicos de frequências e magnitudes totalmente fora do espectro uniformitarista porque não são diretamente observáveis atualmente. Isso atrasou a emergência e o progresso científico da concepção catastrófica da geologia.

Na Terra, essa concepção nasceu com a aceitação do conceito de megainundação como um processo geológico após uma controvérsia científica prolongada, iniciada por Harlen Bretz em 1923 sobre a origem das *Channeled Scablands* no noroeste dos EUA. Essa discussão se extendeu para Marte nos anos 1970 quando canais de inundações catastróficas foram detectados na superfície do planeta vermelho (*e.g.*, Baker & Milton, 1974). Portanto, pode-se concluir que, hoje, a busca pelo entendimento do chamado "neocatastrofismo interplanetário" é uma realidade que não pode ser ignorada ou negligenciada, e com a qual esta pesquisa buscou contribuir.

Dentro deste escopo, comparando os registros geológicos de eventos de grande magnitude e baixa frequência, pode-se concluir que: (i) alguns dos mecanismos geradores de megainundações conhecidos e estudados na Terra claramente ocorreram em Marte; (ii) impactos de meteoritos e atividade vulcânica foram processos muito mais ativos em Marte na causa das megainundações; (iii) em Marte, as megainundações envolveram fontes subterrâneas de água líquida, tanto confinada abaixo da criosfera quanto em fraturas das rochas da crosta; e (iv) as megainundações marcianas foram notoriamente maiores que aquelas registradas na história geológica mais recente da Terra, constatadas pelas dimensões das feições erosivas e deposicionais preservadas na superfície do planeta vermelho.

3 METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa consistiu em três etapas: (i) aquisição de imagens de satélite, (ii) fotointerpretação de feições geomorfológicas, e (iii) concepção de um modelo de megainundação. Essas etapas abordam os principais métodos e técnicas utilizados na aquisição, análise e interpretação dos dados.

3.1 AQUISIÇÃO DE IMAGENS ORIBITAIS

O banco de dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) foi usado para fornecer imagens para esta pesquisa. Algumas das imagens usadas foram adquiridas do *Thermal Emission Imaging System* (THEMIS) da *Mars Odyssey Mission* (ODY), e do *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA) da *Mars Global Surveyor Mission* (MGS). As imagens do THEMIS são produzidas a partir da combinação do imageamento do visível (5 comprimentos de onda) e do infravermelho (9 comprimentos de onda). Já as imagens do MOLA são produzidas a partir do tempo em que um pulso de luz emitido para a superfície planetária leva para retornar ao espelho coletor a bordo da sonda espacial. A MGS foi lançada em 1996, operando até 2006, enquanto que a ODY foi lançada em 2001 e continua em funcionamento.

A pesquisa também foi baseada na interpretação de imagens orbitais de alta resolução disponíveis no Google Earth Pro. O *site* Google Mars foi utilizado conjuntamente para fornecer dados atualizados e precisos sobre as feições geomorfológicas alvo, como nomes, tipos e medidas de diâmetros. Todas as imagens utilizadas são fornecidas pelo *Planetary Data System* (PDS); a topografia é gerada pelo MOLA e imagens colorizadas (mosaico global) são geradas pelo *Viking Orbiter* MDIM 2.1 (banda do visível). Ainda, o *The National Geographic Map of Mars*, acessível no site do MOLA foi usado com imagens de elevação coloridas e de sombreamento de Marte no *software* QGIS. Todos os dados estão disponíveis abertamente para acesso e *download* na Internet.

3.2 FOTOINTERPRETAÇÃO DE FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS

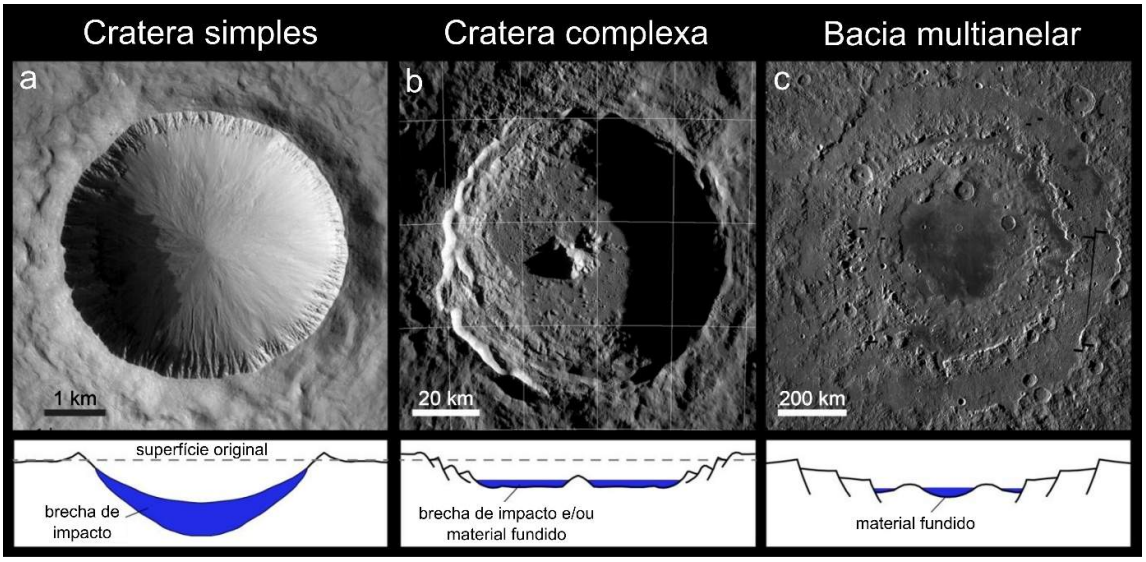
As imagens de elevação coloridas e de sombreamento de Marte foram usadas no QGIS para o mapeamento de feições geomorfológicas nas duas áreas de estudo. Foram mapeadas crateras e depressões caóticas em azul (feições de formato circular

isoladas) e canais foram indicados com setas brancas (feições alongadas com formato de vales). As imagens de satélite adquiridas do Google Earth Pro foram carregadas no *software* de desenho Inkscape com o objetivo de traçar e delimitar as feições geomorfológicas de interesse, diferenciando-as com cores.

Feições geomorfológicas de formato circular (crateras e depressões) foram individualizadas em polígonos azul-claros, feições alongadas com formato de vales (canais) foram demarcados com polígonos vermelho-claro e feições alongadas complexas (em forma de barra) foram individualizadas em polígonos amarelo-claro. Terrenos caóticos encontrados dentro das feições circulares foram indicados pelas iniciais “CT” (*Chaotic terrain*). As zonas de ruptura da borda destas feições foram tracejadas e indicadas pelas iniciais “BB” (*Basin-breach*).

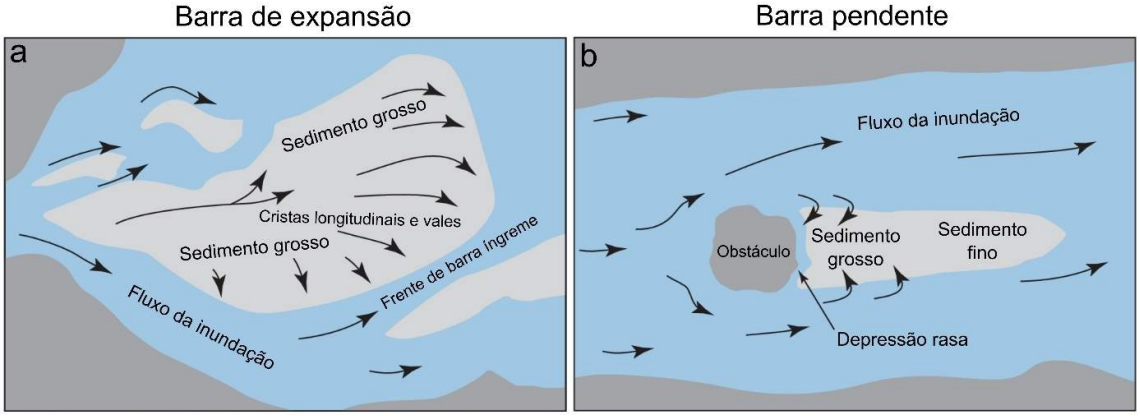
Esse método é sustentado por meio da aplicação da analogia geológica de fenômenos planetários similares (Baker, 2014); crateras de impacto foram classificadas de acordo com French (1998), que as discriminou em crateras simples, crateras complexas e bacias multianelares (ver subseção 2.2.1) (Fig. 19); e feições deposicionais em forma de barra foram classificadas de acordo com Carling (2017) que, para o escopo desta pesquisa, incluem as barras de expansão e as barras pendentes (ver subseção 2.3.1) (Fig. 20).

Figura 19 – Classificação de crateras de impacto.



(a) A cratera simples tem formato de tijela com uma borda bem definida. (b) A cratera complexa tem fundo raso, um pico ou soerguimento central e diversos terraços nas bordas. (c) A bacia multianelar é ampla, rasa e com bordas anelares concêntricas. Essa classificação foi originalmente desenvolvida por Melosh (1989) e posteriormente atualizada por French (1998). Fonte: modificado de Laczniak (s.d.).

Figura 20 – Classificação resumida de barras deposicionais de inundação.



(a) Barras de expansão ocorrem onde o canal expande e a energia do fluxo é reduzida. (b) Barras pendentes ocorrem no lado a jusante de obstáculos ao fluxo no canal, como colinas isoladas. Fonte: modificado de Carling (2017).

Perfis de elevação perpendiculares aos canais (na zona de ruptura da borda da bacia – “BB”) com 128ppd (*pixel per degree*) foram gerados em uma banda de imagem de temperatura diurna fornecida pelo MOLA dentro do *software* de sensoriamento remoto JMARS.

3.3 CONCEPÇÃO DE UM MODELO DE MEGAINUNDAÇÃO

Um modelo conceitual de megainundação foi concebido a partir de dois mecanismos geradores propostos: o mecanismo de flexura litosférica induzida por impacto, responsável pela inundação de crateras através de erupções de água subterrânea, e o mecanismo de rompimento da bacia causado por erosão da borda, que desencadeou os eventos de megainundações (ver seção 4). O modelo é ilustrado por bloco-diagramas 3D os quais foram gerados no *software* Inkscape.

Todos os procedimentos de trabalho foram baseados em metodologias similares encontradas na literatura selecionada. Por isso, o levantamento bibliográfico foi indispensável ao longo de todas as etapas da pesquisa.

4 ARTIGO CIENTÍFICO

Os resultados, discussões e conclusões da pesquisa são apresentados no artigo científico a seguir, submetido à revista *Planetary and Space Science*, da editora Elsevier. Abaixo está a confirmação de submissão à revista.

1/14/26, 10:06 AM Gmail - PSS-D-26-00014 - Confirming your submission to Planetary and Sp…

Gmail **Robert <mscsauerob@gmail.com>**

PSS-D-26-00014 - Confirming your submission to Planetary and Space Science
1 message

em@editorialmanager.com <em@editorialmanager.com> Mon, Jan 12, 2026 at 2:58 PM
Reply-To: noreply_emsupport@elsevier.com
To: Robert Sauer <mscsauerob@gmail.com>

This is an automated message.

Impact-induced lithospheric flexure and basin-breaches on Mars: a megaflood model

Dear Mr. Sauer,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Planetary and Space Science. It has been assigned the following manuscript number: **PSS-D-26-00014**.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at https://www.editorialmanager.com/pss/, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Planetary and Space Science

FAQ: How can I reset a forgotten password?
https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/28452/supporthub/publishing/kw/editorial+manager/

For further assistance, please visit our customer service site: https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about Editorial Manager via interactive tutorials. You can also talk 24/7 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

This journal uses the Elsevier Article Transfer Service. This means that if an editor feels your manuscript is more suitable for an alternative journal, then you might be asked to consider transferring the manuscript to such a journal. The recommendation might be provided by a Journal Editor, a dedicated Scientific Managing Editor, a tool assisted recommendation, or a combination. For more details see the journal guide for authors.

At Elsevier, we want to help all our authors to stay safe when publishing. Please be aware of fraudulent messages requesting money in return for the publication of your paper. If you are publishing open access with Elsevier, bear in mind that we will never request payment before the paper has been accepted. We have prepared some guidelines (https://www.elsevier.com/connect/authors-update/seven-top-tips-on-stopping-apc-scams) that you may find helpful, including a short video on Identifying fake acceptance letters (https://www.youtube.com/watch?v=o5l8thD9XtE). Please remember that you can contact Elsevier s Researcher Support team (https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/) at any time if you have questions about your manuscript, and you can log into Editorial Manager to check the status of your manuscript (https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/29155/c/10530/supporthub/publishing/kw/status/).
#AU_PSS#

To ensure this email reaches the intended recipient, please do not delete the above code

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Remove my information/details). Please contact the publication office if you have any questions.

Impact-induced lithospheric flexure and basin-breaches on Mars: a megaflood model

Robert Sauer [1]*, Michael Holz [2]

[1]Universidade Federal de Santa Catarina, Postgraduate Program in Geology – Florianópolis (SC), Brazil. [2]Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências – Salvador (BA), Brazil.
*Corresponding author. *Email address*: mscsauerob@gmail.com

Abstract

Megafloods occurred on the early Mars after the heavy bombardment period (~4.1 Ga). Large impact craters and depressions with chaotic terrain seem to have placed closed circular-shape lakes, especially in Xanthe, Margaritifer and Arabia Terra regions. Amongst several terrestrial-like mechanisms related to catastrophic flooding, basin-breach caused by rim erosion seems to be the most compelling process to have taken place in these ancient Martian lakes and a conceptual model which seeks to explain the overwhelming geological evidence for megafloods on Mars was developed, based upon high-resolution satellite images from NASA's database in Google Earth Pro. Paleolakes and associated megaflow channel were delineated by photointerpretation. Fifteen crater lakes and five depression lakes were recognized in the study areas. The mechanism of basin-breach was recognized as the trigger for the megafloods originated from these lakes. The mechanism of impact-induced lithospheric flexure was proposed as the trigger of the groundwater outbursts inside the basins. The megaflood model depicted consists of four stages: (i) pre-impact; (ii) impact, crater formation and lithospheric flexure; (iii) formation of crater lake; and (iv) megaflood. The intense meteorite impacts that modified Mars' Noachian highlands may help us to understand more about the history of water in the Red Planet's geological past. Thus, the importance of an alternative megaflood model under a neocatastrophic approach.

Keywords: Mars, Megafloods, Basin-breach, Lithospheric flexure

1. Introduction

Megafloods are events of very large magnitude and extremely low frequency. These are events in the order of 10^4 years and have put uniformitarianism completely in check since the 1980's. Events of greater magnitude are very rare, even on the scale of geological time, and the interval between one event and the next leaves significant gaps in the stratigraphic record. This led to what today is known as neocatastrophism or actualistic catastrophism (e.g., Ager, 1980, 1993; Hsü, 1983, 1990).

Outbursts of large dammed bodies of water produce extremely voluminous and geomorphically impactful floods that shape the landscape. The largest known floods resulted from sudden breaches of natural dams that were holding huge amounts of water or were blocking huge drainage systems. There are key geographic settings which may lead to megafloods: (i) river valleys that are blocked by ice, landslides, or volcanic materials; and (ii) closed basins, such as tectonic depressions and calderas, and those surrounded by glaciers.

Baker & Milton (1974) represent one of the first studies on catastrophic floods on Earth and Mars, using the Missoula flood event as an analog to the Martian erosional features. Since then, many authors have been studying those catastrophic events on both planets (Komar, 1983; Tanaka, 1986; Robinson & Tanaka, 1990; Wilson et al., 2004; Harrison & Grimm, 2005; Wang et al., 2005; Baker, 2009; Pacifici et al., 2009; Harrison & Chapman, 2010; Carr & Head, 2010; Cabrol & Grin, 2010; Andrews-Hanna & Lewis, 2011; Baker et al., 2015; Rodriguez et al., 2015; Lapotre et al., 2016; Turbet et al., 2017; Palumbo & Head, 2020; Gallagher et al., 2021).

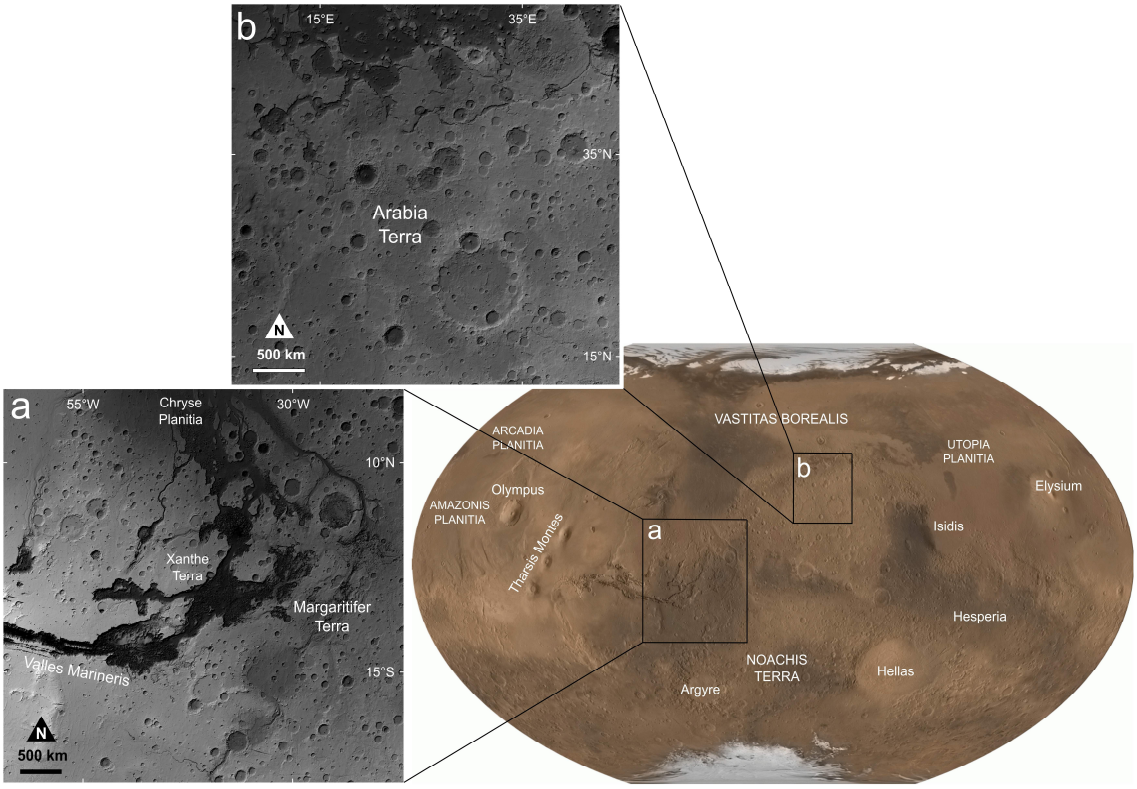
Several authors have been proposing the geological triggering-mechanisms of the megafloods on Mars. Some suggest that impacts could have been the main trigger for the megaflood events (Wang et al., 2005), others point to global precipitation of warm rainfalls (Segura et al., 2002; Turbet et al., 2017). The most accurate and compelling studies agree on the sudden outburst of large volumes of groundwater from a water-saturated upper crust, either due to subglacial volcanism (Baker et al., 2015) or superlithostatic pressures (Rodriguez et al., 2015). Indeed, there are water remnants of liquid water in permeable rocks in the Martian mid-crust (Wright et al., 2024), which points to the existence of a confined aquifer in Mars' subsurface. However, there is still a missing link between the meteorite impacts of the heavy bombardment period (Segura et al., 2002) and the crustal responses to the pressures of those impacts.

This is what this paper is dealing with. The main goal is to investigate the probable mechanism involved in the outbursts of groundwater on Mars that led to the formation of lakes and the triggering mechanisms of the megaflood events. This formed the backgrounds of the working hypothesis of this study: if the meteorite impacts are the cause of groundwater outbursts, then the mechanism of catastrophic flooding on Mars requires a different conceptual model from the ones designed for Earth.

1.1. Study areas and geological setting

Two areas were delimited on Mars (Figs. 1a and 1b). The first area (Fig. 1a) is located around the Martian equatorial zone (between 20°N and 30°S), where the greatest craters, chaotic depressions and channels are found. Some large, well-known outflow channels are Ares Vallis, Shalbatana Vallis, Tiu and Simud Vallis, Maja Valles and Ravi Vallis. The largest channels discharge at Chryse Planitia, in the Northern

Hemisphere. Some examples of impact craters are: Galilaei, Orson Welles, Morella, Holden and Masursky; chaotic depressions, such as Aram, Aromatum, Hydraotes and Oxia are also important landmarks.



Projection: Robinson
Datum: Mars 2015 Sphere
Topography: Shaded MOLA Elevation

The National Geographic Map of Mars (MOLA)
Projection: Winkel-Tripel

Fig. 1. Location of the two study areas on The National Geographic Map of Mars from the Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA). (a) Study Area 1, located around the equatorial zone (Xanthe and Margaritifer Terra). (b) Study Area 2, located in the upper Arabia Terra. The images of both areas were obtained using Mars shaded grayscale MOLA elevation.

The second area (Fig. 1b) is located in the upper Arabia Terra (between 18°N and 45°N). In this area, some fewer known craters and channels are found, such as Ismenius Cavus, Deuteronilus Cavus, Mamers Valles and Indus Vallis. The largest channels of this area have their discharge at Acidalia Planitia, in the Northern Hemisphere.

Essentially, the impact craters, chaotic depressions and channels are located in Noachian and Hesperian units (4.1 to 3 Ga), in Xanthe, Margaritifer and Arabia Terra regions, below the global dichotomy. The channels carve mid-Noachian units and terminate at lower to upper-Hesperian plains. The three geologic periods of Mars —

Noachian, Hesperian and Amazonian — were defined by Scott & Carr (1978) and updated in the USGS Geological Map of Mars by Tanaka et al. (2014).

2. Methods

2.1. Acquisition of orbital imagery

The research was based on interpretation of high-resolution orbital images from NASA's photographic database available on Google Earth Pro. Google Mars provided accurate and updated information about the target geomorphological features, such as names, types and diameters. All images used are provided by the Planetary Data System (PDS); topography is covered by the Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) and colorized-based images (global mosaic) are generated by the Viking Orbiter MDIM 2.1 (visible layer). In addition, the National Geographic Map of Mars, accessible at MOLA's website was used with Mars shaded grayscale and colored elevation images on QGIS.

2.2. Photointerpretation of geomorphological features

In the photointerpretation method, the orbital imagery acquired from Google Earth Pro as well as the images generated on QGIS were loaded into Inkscape drawing software in order to trace and delineate all the target geomorphological features, differentiating them with colors. Isolated circular-shape features (craters and depressions) were mapped with light blue polygons, elongated valley-shape features (channels) were mapped with light red polygons and complex elongated-shape features (barforms) were mapped with light yellow polygons. Chaotic and scattered rocky terrain found in the isolated circular-shape features interiors were indicated by "CT". The basin-breach zones of these features were dashed and indicated by "BB". Giant bars were indicated by "GB".

The criterion for selecting the isolated circular-shape features to be mapped was the presence of the elongated valley-shape features connected to their rims. Features that do not have them were not considered in the mapping. Linear streamlined erosional features are of positive relief and indicated by "SL".

Terrestrial analogy of similar planetary phenomena is supported by Baker (2014); Impact structures identification and classification are based on French (1998); and depositional flood bars classification is based on Carling (2017).

Perpendicular channel elevation profiles (at the basin-breach zone) with 128ppd were generated in a daytime temperature image layer provided by MOLA inside JMARS remote sensing software (The ASU Mars Scientific Software Team).

2.3. Conception of a megaflood model

A conceptual megaflood model was conceived considering the two proposed mechanisms of megafloods: the impact-induced lithospheric flexure, which conducted the lake infilling through a crustal fracture network, and the basin-breach caused by rim erosion, which worked as the trigger for the catastrophic megaflood events. This model is illustrated by 3D-diagrams generated in the Inkscape drawing software.

All this procedure was supported by a careful literature review of similar work methodologies.

3. Results and discussions

3.1. Craters, depressions and channels

Fifteen impact craters and five chaotic depressions (light blue polygons) were mapped in both study areas (Figs. 2a and 2b). Each of them originates one or more channels (light red polygons). There are some craters connected to one another with the same channel. In this case, an inlet channel enters the basin from the opposite rim and streamlined features indicate the paleoflow direction. These inlet channels come from the outflow of a previous basin. Channels usually carve the landscape discharging in the northern plains (Chryse and Acidalia).

The largest depressions in the study areas, such as Aram and Ladon, are Quasi Circular Depressions (e.g., Carr & Head III, 2010), and might be remnants of impact basins that pre-date the formation of the Noachian craters. These structures vary from ~250 km up to 400 km in diameter. Most of the craters are well-circular-shape, with diameters varying from ~20 km up to ~200 km and ~2 km of maximum depth. There are juxtapose craters creating complex elongated shapes.

Very well-preserved erosional features were recognized, such as scouring, chaotic rocky terrain, valley formation and rim erosion. Within the channels, erosive streamlines (SL), giant bars (GB), cataracts (Ct) and alluvial fans (AF) were recognized. Basin-breach by rim erosion was recognized as the mechanism of channel formation, as presented and discussed in the following section.

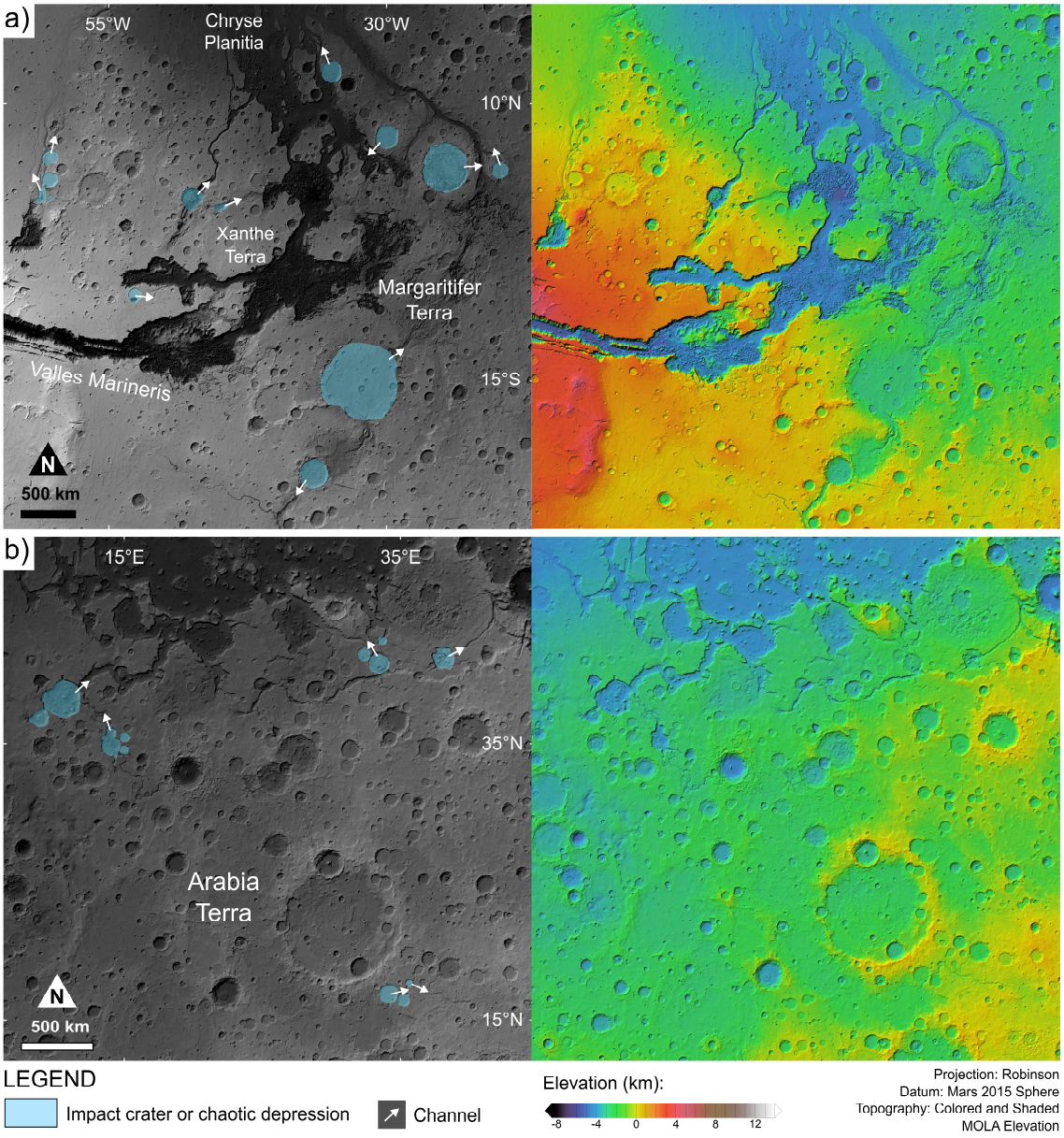


Fig. 2. Craters, depressions and channels in both study areas, Mars. Craters and depressions are identified by light blue polygons and channels are indicated by white arrows. (a) The equatorial region, that comprises Margaritifer Terra, Xanthe Terra, the terminal section of Valles Marineris, and the southern Chryse Planitia. (b) The upper Arabia Terra region, in the northern Hemisphere. Mars shaded grayscale and colored MOLA Elevation.

3.2. Basin-breaches

Galilaei complex crater (Fig. 3a) is circular-shape and diameter around 130 km. It has a 4 km-wide channel (Tana Vallis) and another smaller next to it (southwestern rim). It also has more significant chaotic rocky terrain in the southwestern portion. Channels run to SW and South discharging into a large, perpendicular outflow channel that runs to NW. Figure 3b gives a detailed view, showing a smaller crater in between the two channels, which also has smaller channels that connect this crater to the major channels.

Stege complex crater (Fig. 3c) is semi-circular-shape and diameter around 75 km, with chaotic terrain in its southern portion. It has two main channels separated by one giant pendant bar in the northern rim. They are 16 km and 13 km-wide at the basin-breach zone. Erosive streamlines occur within the channels.

Chia complex crater (Fig. 3d) is circular-shape and around 90 km in diameter. A breached northwestern rim forms a 12 km-wide channel that discharges into Maja channel and Stege crater. Maja channel (left side) has several streamlined pendant bars with paleoflow direction to the North.

Aromatum chaotic depression (Fig. 4a) has an elongated shape and chaotic terrain in most of its substrate. Its basin-breach zone originates a 20 km-wide channel that runs to NE, marked by long erosive streamlines on its bottom. This channel intercepts Iamuna and Oxia chaotic depressions. Basin-breach has occurred at Oxia depression (Fig. 4b) excavating a wide channel running to the West into Hydraotes chaotic depression. The 30 km-wide channel falls into Hydraotes depression with cataract-like features (the terminal section of Ravi Vallis). Streamlined giant bars and erosive streamlines are well-preserved.

Ismenius complex crater (Fig. 4c) is approx. 50 km in diameter (main crater). Four alluvial fans were also identified, and they are related to smaller peripherical craters. A 5 km-wide channel at the basin-breach zone was formed in the northern rim, which runs to the North. Ismenius crater is connected to other landmarks (such as Deuteronilus Cavus and Mamers Valles) by the same channel network.

Melosh complex crater (Fig. 4d) has a diameter of approx. 90 km and a circular shape. Its channel (20 km-wide at the basin-breach zone) connects it to a smaller crater to the North in which basin-breach has also occurred and formed another channel that discharges into Ares Vallis (on the left).

Some craters, like Ismenius (Fig. 4c) and Melosh (Fig. 4d), have inlet channels in the opposite rim, connecting them to other nearby craters and forming a channel network. This channel network shows a stream pattern interrupted by similar-size impact structures. This pattern occurs again in Ladon depression (Fig. 5a), crater in figure 5d, Masursky crater (Fig. 6d) and in the craters in figures 7c and 7d.

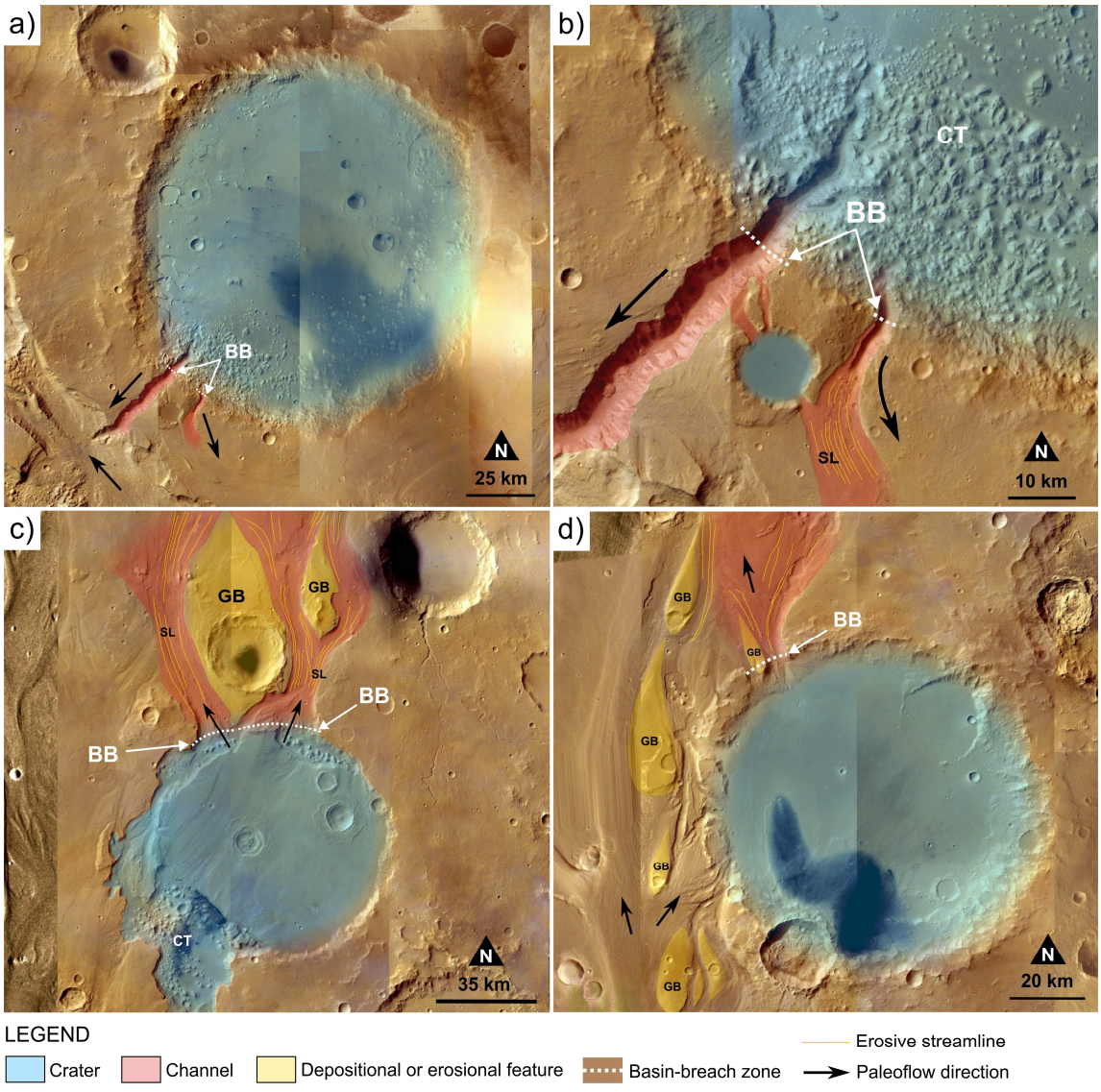


Fig. 3. Basin-breaches at three different craters in the study area 1, Mars. (a) Galilaei complex crater (5°N/26°W); Tana channel in the crater's southwestern rim discharges into a perpendicular outflow channel. (b) A detailed view of Galilaei crater and Tana channel, showing erosive streamlines within a secondary channel and a smaller crater in between the channels. (c) Stege complex crater (3°/59°W) and a northern rim channel divided by a giant pendant bar. (d) Chia complex crater (1°N/59°W) and a northwest rim channel, with streamlined pendant bars (left channel). Stege and Chia channels are part of Maja Valles. White dashed lines indicate the basin-breach zone and black arrows indicate the paleoflow direction. BB = Basin-breach; CT = Chaotic terrain; GB = Giant bar; SL = Streamline. Google Earth Pro orbital images.

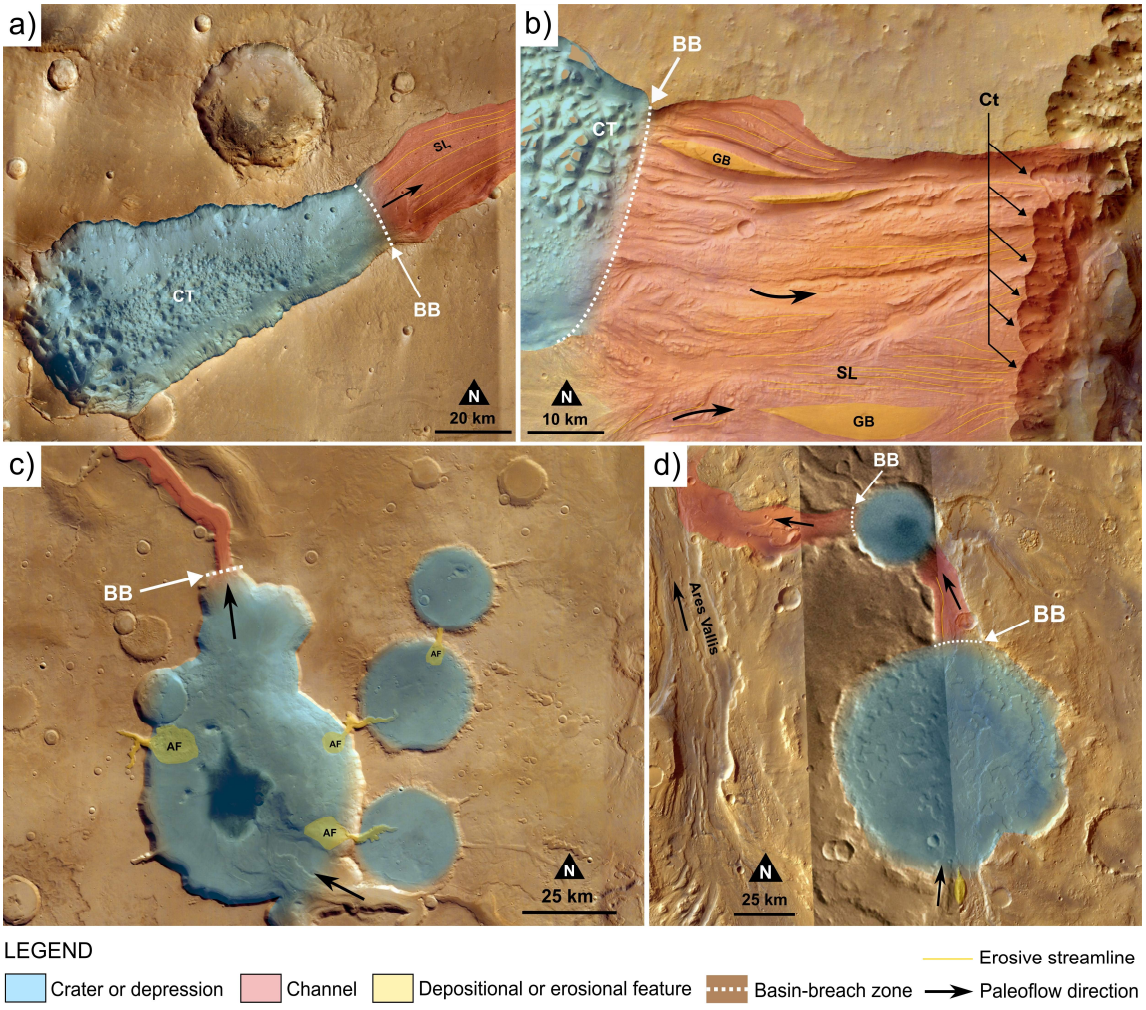


Fig. 4. Basin-breaches in the study area 1 (a, b, d) and in the study area 2 (c), Mars. (a) Aromatum chaotic depression (1°N/43°W); its channel runs to NE, with erosive streamlines. (b) Oxia chaotic depression (left side) (0°N/40°W) and Ravi channel discharging at Hydraotes chaotic depression (right side). Note the streamlined giant bars and the cataract-like features. (c) Ismenius complex crater (33°N/17°E); the channel in the northern rim discharges into Deuteronilus crater; and smaller peripherical craters (right side). (d) Melosh complex craters (2°N/15°W) east of Ares Vallis (left side) and their channels discharging into Ares Vallis. White dashed lines indicate the basin-breach zone and black arrows indicate the paleoflow direction. BB = Basin-breach; CT = Chaotic terrain; GB = Giant bar; SL = Streamline; Ct = Cataracts; AF = Alluvial fan. Google Earth Pro orbital images.

Ladon depression in figure 5a (approx. 400 km in diameter) is circular-shape and has a 22 km-wide channel (Morava Valles) in the northern rim, running to NE. It also has channels entering it in the southern rim (Ladon Valles), showing streamlined giant bars.

Aram chaotic depression (Fig. 5b) is approx. 260 km in diameter and circular-shape. It has a fractured substrate on the western portion and relatively low depths. Chaotic terrain is present on its substrate and a 10 km-wide channel at the basin-breach zone in the eastern rim, which discharges into Ares Vallis.

Baetis chaotic depression (Fig. 5c) originates a very large channel (Maja channel) in the northern rim (50 km-wide at the basin-breach zone) with streamlined giant pendant bars and erosive streamlines. Chaotic depression on the right originates a delta-like channel which starts at a 3 km-wide basin-breach zone and discharges into Chia crater.

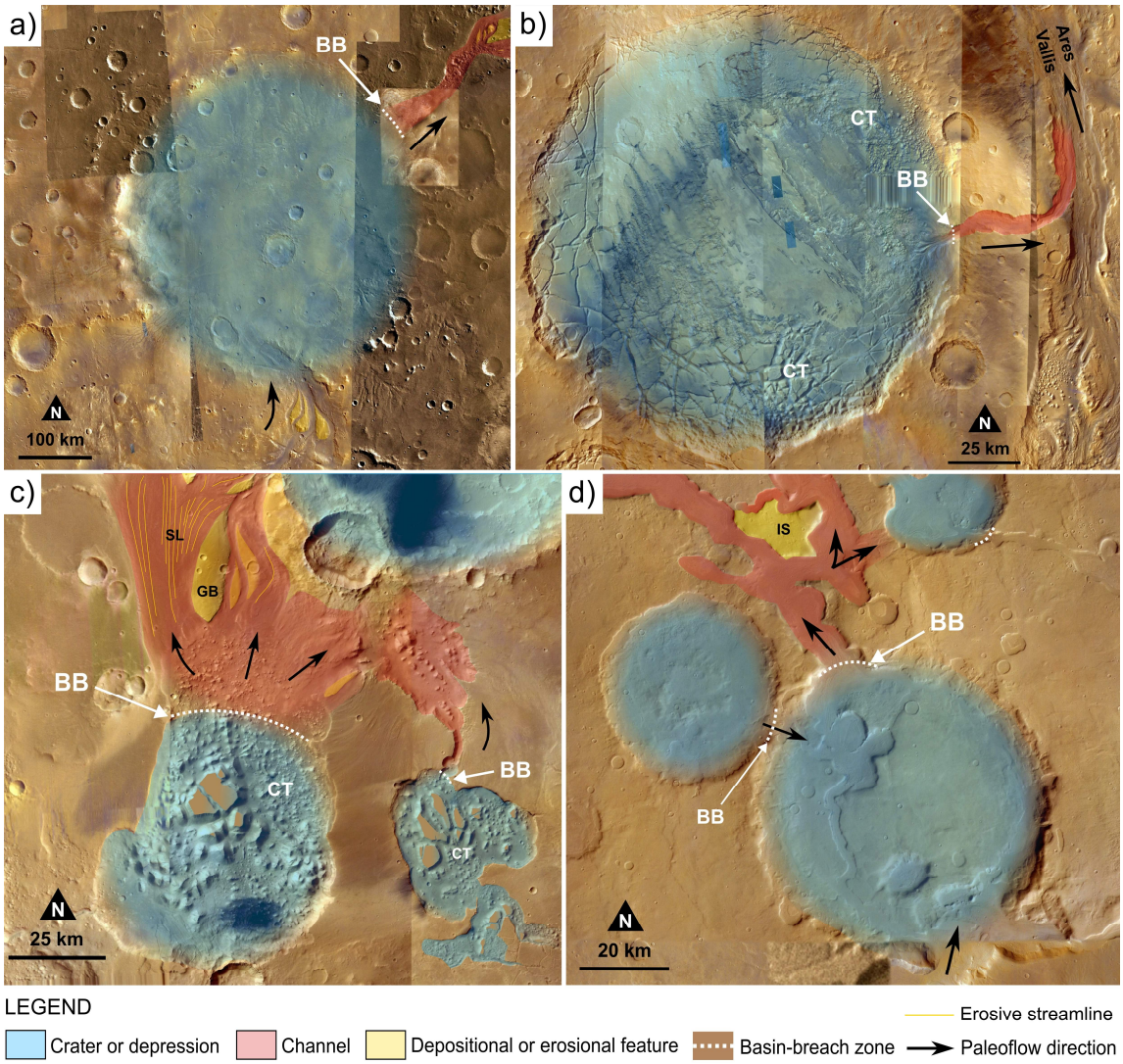


Fig. 5. Basin-breaches in study area 1 (a, b, c) and study area 2 (d), Mars. (a) Ladon depression (17°N/29°W) with Morava channel in the northeastern rim; Ladon channel enters it in the southern rim. (b) Aram chaotic depression (2°N/21°W) with its channel discharging into Ares Vallis (right side). (c) Baetis chaotic depression (0°N/60°W) and its neighbor chaotic depression (right side, 0°N/59°W); Maja channel shows streamlined giant pendant bars and erosive streamlines; the smaller depression has a delta-like channel. (d) Complex crater (38°N/34°E), its channel and smaller, peripherical craters. White dashed lines indicate the basin-breach zone and black arrows indicate the paleoflow direction. BB = Basin-breach; CT = Chaotic terrain; GB = Giant bar; SL = Streamline. Google Earth Pro orbital images.

Complex crater in figure 5d is approx. 63 km in diameter and is circular-shape. It forms a channel running to NW in a 9 km-wide, breached northern rim. Another channel enters the crater from the southern rim. A smaller crater to the left is connected to the main crater. Some of the small, peripherical craters that surround the main crater also have basin-breaches, like in figure 5d. In other cases, however, basin-breaches have not occurred, like in figures 5a and 5b. It is noteworthy that basin-breaches are only present in larger craters and depressions (> 20 km in diameter).

Orson Welles complex crater (Fig. 6a) has a semi-circular shape and diameter of 115 km. In the northeastern rim a 30 km-wide basin-breach zone originates a channel running to NE (Shalbatana Vallis). It has chaotic terrain in most of its substrate and cataract-like features within the channel.

Morella complex crater (Fig. 6b) is circular-shape and 83 km in diameter. It forms a channel (Elaver Vallis) in a 5.5 km-wide basin-breach zone in the eastern rim. It shows a giant expansion bar that divides the channel.

Holden complex crater (Fig. 6c) is approx. 150 km in diameter and circular-shape, originating a 20 km-wide channel that runs to the South (Uzboi Vallis). This channel starts at a 7 km-wide basin-breach zone in the southern rim of the crater.

Masursky complex crater (Fig. 6d) is also circular-shape and 115 km in diameter. Chaotic terrain occurs in its substrate around the southern portion (Chryse Chaos), where the rim is completely vanished. A 20 km-wide basin-breach zone in the northern rim forms a straight, 12 km-wide channel that discharges into Tiu Vallis.

Deuteronilus complex crater (Fig. 7a) is semi-circular-shape and 120 km in diameter. A 20 km-wide channel runs to NE (Mamers Valles) which starts in a 9.3 km-wide, eastern breached rim. A smaller crater is located next to it (lower left corner) which also has a basin-breach zone that connects it to the main crater.

Complex crater in figure 7b is circular-shape and approx. 64 km in diameter. It has a 10 km-wide, eastern breached rim that originates a straight, 5 km-wide channel running to NE. Erosive streamlines are well-preserved within the channel.

Complex crater in figure 7c is also circular-shape and approx. 25 km in diameter. A 2.4 km-wide basin-breach zone is located in its northern rim which forms a very long, narrow channel running to SE (Indus Vallis). In the southern rim, there is another channel (partially visible) entering the crater. This is the same channel that flows from the crater in figure 7d.

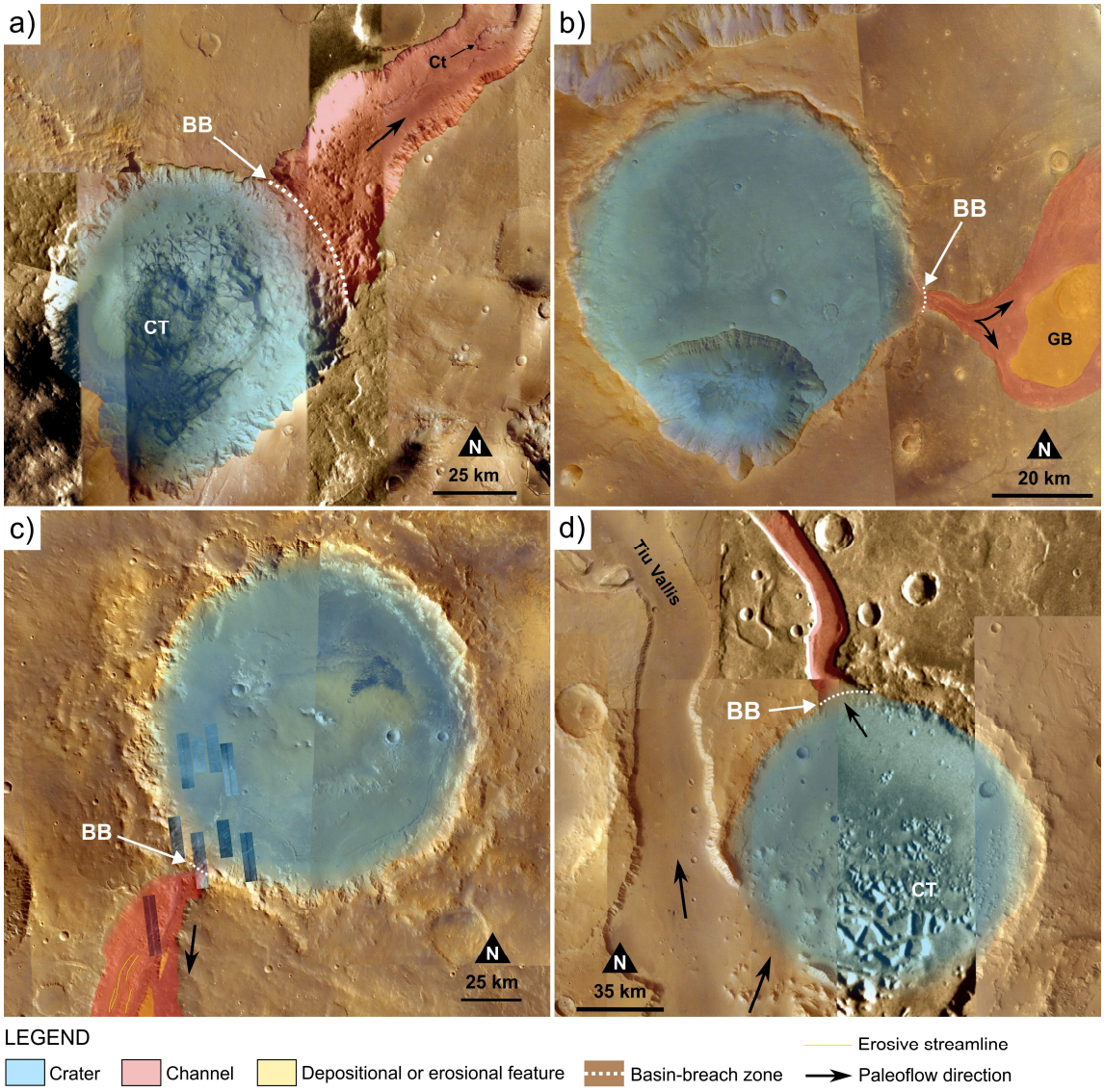


Fig. 6. Basin-breaches at four different craters in the study area 1, Mars. (a) Orson Welles complex crater (0°N/45°W) and the origin of Shalbatana channel in Orson's northeastern rim. (b) Morella complex crater and Ganges Cavus (9°N/51°W); Elaver channel in the eastern rim, with a giant expansion bar. (c) Holden complex crater (26°S/34°W) and Uzboi channel in the southwestern rim. (d) Masursky complex crater (11°N/32°W) has its southern rim completely vanished and a chaotic substrate (Chryse Chaos); its northern rim channel runs towards Tiu Vallis (left side). White dashed lines indicate the basin-breach zone and black arrows indicate the paleoflow direction. BB = Basin-breach; CT = Chaotic terrain; GB = Giant bar. Google Earth Pro orbital images.

Complex crater in figure 7d is connected to two nearby craters by another major channel. The largest crater is approx. 67 km in diameter and circular-shape. Its channel starts at a 5 km-wide basin-breach zone in the crater's eastern rim.

Similarly to figure 5, small craters surrounding Deuteronilus crater in figure 7a also have basin-breaches. While the closest small crater can be connected to Deuteronilus through a basin-breach channel, the other surrounding small crater,

located a little farther, does not reach it and remain isolated. Small craters in figure 7d do not have basin-breach zones.

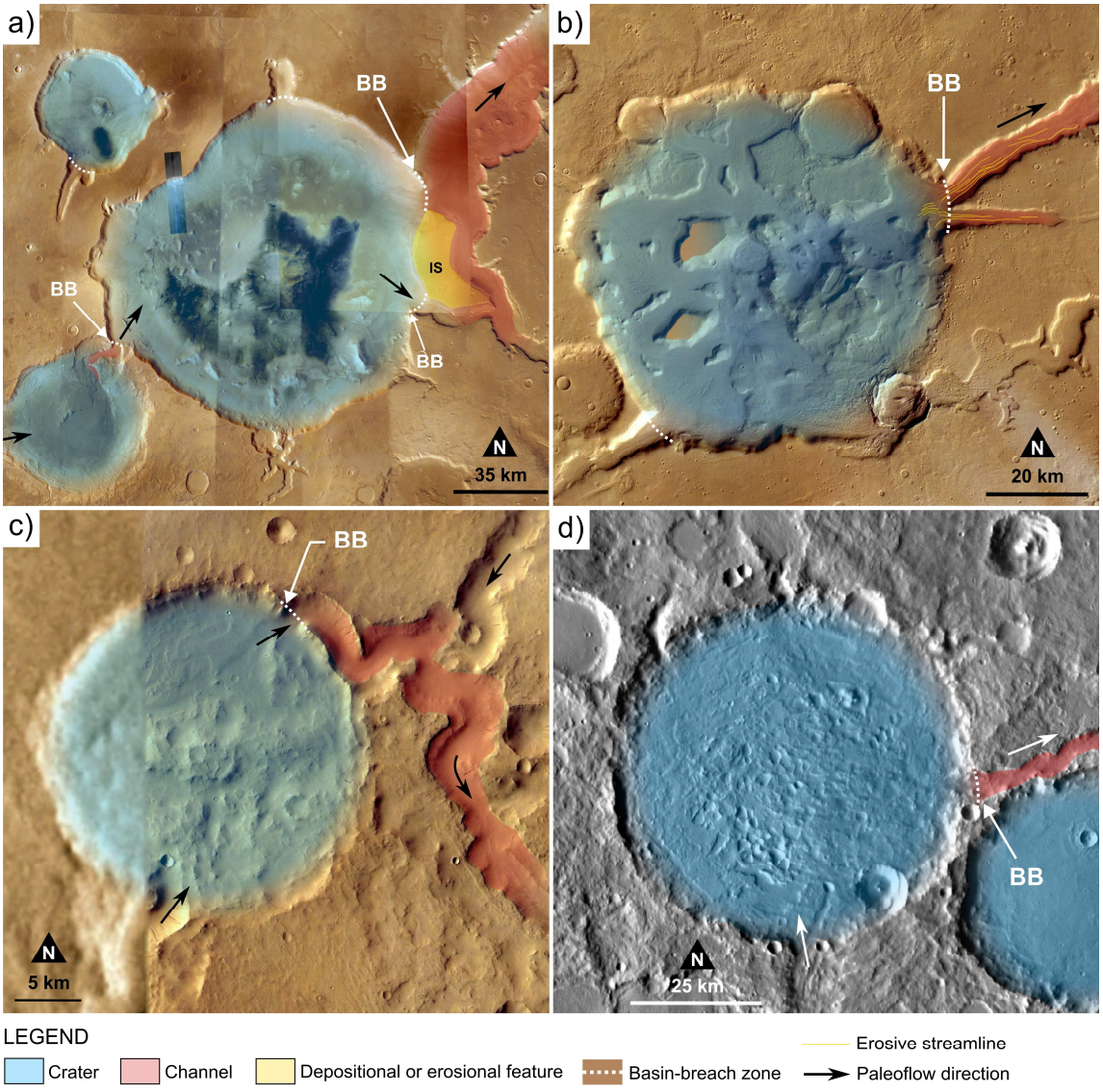


Fig. 7. Basin-breaches at four different craters in the study area 2, Mars. (a) Deuteronilus complex crater (36°N/13°E), Mamers channel and smaller, peripherical craters (left side). (b) Complex crater (38°N/38°E) and its channel in the eastern rim that discharges into Ismeniae Fossae. (c) Complex crater (19°N/36°E) and Indus channel in the northern rim; another channel enters it in the southern rim. (d) Complex crater (19°N/35°E), its channel in the eastern rim and a smaller, peripherical crater (lower right corner). White dashed lines indicate the basin-breach zone and black arrows indicate the paleoflow direction. BB = Basin-breach. Google Earth Pro orbital images (a, b, c) and JMARS daytime temperature layer image (d).

There are mainly two types of paleolakes on the study areas: (i) impact crater lakes and (ii) depression lakes. Although depressions are not considered impact craters, the largest ones are interpreted as “QCD’s” resembling ancient impact

structures. This observation suggest that those depressions formed due to the existence of older impact craters buried in sediments beneath the Martian surface, in which a mechanical subsidence (abatement) must have occurred later. This can be the reason why chaotic terrain is not found in some of them, like in Ladon depression (Fig. 5a). Despite that, the depressions flooded and their rims retained water in the same way as the impact craters, and are therefore classified as paleolakes.

All impact crater lakes are placed in complex craters (based on French, 1998) that have their central uplift or peak partially or completely buried in juvenile sedimentary materials. The excavated valleys or channels through which the water was drained from the paleolakes can be named as megaflow channels, in contrast to the Martian outflow channels. Considering the depth and width of these megaflow channels, as shown in the topographic profiles of figure 9, the floodwater paleoflow must have been many times greater than every Pleistocene flood on Earth (see the Bonneville flood comparison in Section 4.3).

Once a rising lake overtops its basin rim, spillover can cause rapid erosion, resulting in release of a large volume of water into the adjacent floodplain. This occurs during wetter periods and cause immense floods (O'Connor & Costa, 2004); thus, this megaflood triggering-mechanism is called basin-breach by rim erosion. Figures 3, 4, 5, 6 and 7 suggest an interpretation of well-preserved geomorphological features that confirm the effects of the basin-breach mechanism (BB) occurring in impact and depression basins interpreted as paleolakes. Almost all paleolakes are circular-shape and each of them has at least one main megaflow channel. Three megaflow channels (Figs. 3a, 4d and 5b) discharge at gigantic, perpendicular outflow channels that run northwards, terminating at Chryse Planitia, in the Northern Hemisphere.

Chaotic rocky terrain (CT) was recognized on most of the substrate of the impact crater paleolakes; the majority of the depression paleolakes consists basically in CT of similar relief. This unique geomorphological feature is found all over the equatorial region especially around Valles Marineris and Margaritifer Terra. Here we associate it with the outbursts of a groundwater super pressurized reservoir. The chaotic relief would be the remnants of the fractured substrate left by the escaping water to the surface. We do not associate it with volcanic activity (e.g., Baker et al., 2015). CT found inside impact craters and depressions are included in the formation of crater lake stage (see Section 4.1.3) of the following megaflood model.

4. The megaflood model

This chapter offers a description of a theoretical model designed to explain, in a coherent manner, the evolutionary phases that resulted in the geomorphological features preserved on Mars, as presented above. A brief discussion follows, outlining the model's strengths and potential weaknesses.

4.1. Description of the conceptual model

The following megaflood model (Fig. 8) shows the summary of the catastrophic history of megaflooding on the study areas. Four stages are proposed to discriminate and describe four different phases in the evolution of a crater lake and its resulting catastrophic flood events.

4.1.1. Pre-impact stage

In the first stage (Fig. 8a), Mars' fractured crust is in a stable state, and it is saturated in liquid water. The groundwater is located within rock cavities forming a thick confined reservoir in a crystalline rock crust. This primitive stage existed during the pre-Noachian era, just before the Heavy Bombardment Period (4.1 to 3.8 Ga).

4.1.2. Impact, crater formation and lithospheric flexure stage

In the second stage (Fig. 8b), Mars' surface is highly disturbed by heavy meteorite bombardment, especially in the Noachian uplands of the Southern Hemisphere. These impacts occurred between 4.1 to 3.8 Ga. As a result of the intense bombardment, many simple craters are formed and will evolve to complex craters. The three-stage impact crater formation follows (Fig. 8b'): 1. Contact and Compression, 2. Excavation, and 3. Modification. The immediate effects of the impacts are: the ejecta curtain, the shock metamorphism zone beneath the crater's floor, the fracturing of the crustal rocks and brecciation.

We suggest that as a result of the heavy bombardment a lithospheric flexure is generated downwards, increasing the lithostatic and hydrostatic pressures within the Martian crust. This flexure also increases the temperature within the fracture network to extreme values. The fracture network becomes a connected system of numerous

rock cavities filled with liquid water. The consequence is a super pressurized hot-water reservoir, reaching ~20 km deep inside the Martian crust.

4.1.3. Formation of crater lake stage

The next stage (Fig. 8c) illustrates the impact crater infilling with liquid water. The water is injected into the crater through violent outbursts from the crust's super pressurized confined reservoir, which includes extreme hot geysers being erupted up to the atmosphere. This leads to the formation of a crater lake, with diameters between 20 km and 200 km and depth average of 2 km. As the groundwater fountains continue to infill the crater, the lake level rises. This stage could have lasted several months or a few years, until the final stage.

4.1.4. Megaflood stage

The final stage (Fig. 8d) starts when the lake level reaches its maximum high. This happens when the water column is reaching the whole capacity of the basin (available infilling space). The overflowing lake starts to erode its rim, as the groundwater continues to supply the lake. In one part of its rim the erosion is greater, causing the basin-breach triggering-mechanism. As a result, a megaflow channel, the lake outlet, is excavated down the adjacent slope. The catastrophic releasing of floodwater through the megaflow channel leads to a massive event that spreads over the surface of the planet. This stage occurs in a matter of days or weeks, and can happen in many lakes simultaneously. Figure 8d' shows in greater detail the process of rim erosion and the water discharge through the excavation of a megaflow channel on the rocky substrate. The megaflow channel width average is 5 km to 15 km and depths of 500 meters to 1.5 km.

4.2. Discussion of the conceptual model

Meteorite impacts follow a succession of stages (Fig. 8b') in which the impacted planetary body is submitted to several geological processes, such as shock or impact metamorphism (French, 1998; Bucher & Grapes, 2011; Osinski et al., 2022) and even global precipitation (Segura et al., 2002). The first stage is called contact and compression. This is followed by the excavation stage, and finally by the modification

stage (Westbroek & Stewart, 1996; French, 1998). It is in the first stage that shock compression takes place, creating shock waves that propagate into the rocks of the planetary subsurface. That is the process in which “pressure-volume work is considerably performed within the rocks and their internal energy is increased” (Osinski et al., 2022).

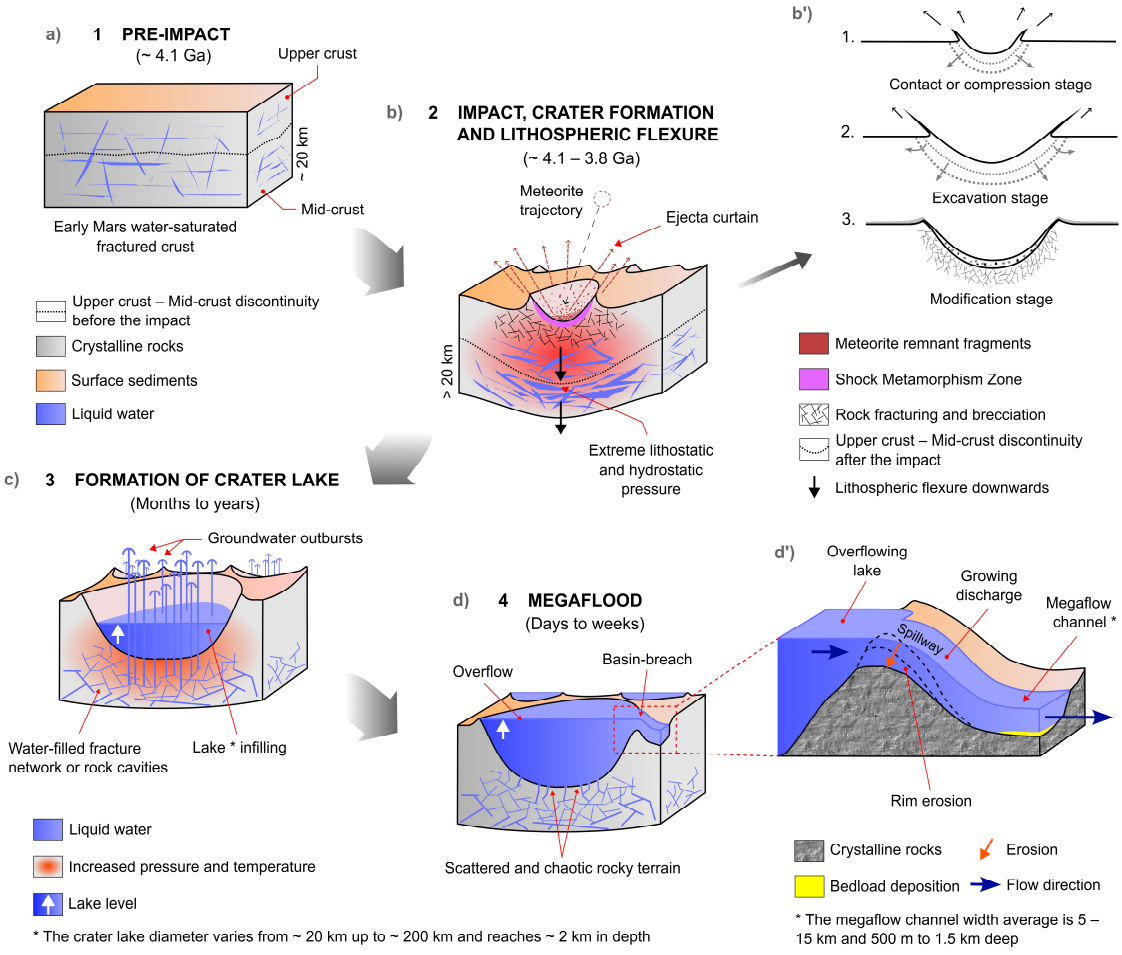


Fig. 8. The megaflood model. (a) Pre-impact stage, with a water-saturated fractured crust in a stable state before the heavy bombardment (~4.1 Ga). (b) Impact, crater formation and lithospheric flexure stage, with the ejecta curtain, shock metamorphism, rock fracturing and brecciation, between 4.1 and 3.8 Ga; a lithospheric flexure is generated beneath the crater increasing the lithostatic and hydrostatic pressures and the temperature of the crustal rocks. (b’) Evolution of a crater formation: 1. Contact stage, with shock waves propagating downwards; 2. Excavation stage, when the crater is enlarged; 3. Modification stage, where erosion, fracturing and maturing prevail (Based on French, 1998). (c) Formation of crater lake stage, when groundwater outbursts infill the basin, and the lake level rises (duration of months to weeks). (d) Megaflood stage, when the lake overflows and the erosion of the crater’s rim result in a basin-breach and a catastrophic release of a huge water volume (duration of days to weeks). (d’) A megaflood in greater detail, showing the rim erosion, the excavation of a megaflow channel (spillway), the water discharge and the bedload deposition forming giant bars.

It is noteworthy that during the following stages, there are downward and outward physical compression of the target rocks — the superficial rocks under the effects of the impact — which generates inward collapse and slumping of the cavities' walls inside the crater (Osinski et al., 2022).

Earthquakes could have been produced as a result of the impact process. Considering that the heavy bombardment (4.1 to 3.8 Ga, *e.g.*, Baker, 2009) was overwhelmingly intense and highly destructive for the early Martian surface — taking into account the topographic and geomorphological data of the study areas —, it is possible that the planet's lithosphere must have been geologically stressed and, consequently, flexed downwards (e.g., Watts et al., 1975). This lithospheric flexure (Fig. 8b) created immense lithostatic and hydrostatic pressures within the crustal rocks. The increased pressures and temperature over the water-filled rock cavities of the fractured groundwater reservoir would have turned it into a super pressurized hot-water aquifer (e.g., Rodriguez et al., 2015). Moreover, volcanic activity related to the Tharsis rise could have influenced the heating of the groundwater.

It is important to point out that at high temperatures and lithostatic pressures Earth's crustal rocks react by ductile deformation to stress, while brittle deformation occurs at low temperature and shallow depth (Bucher & Grapes, 2011). The depth of the brittle-ductile transition depends on the amount of applied stress, the mechanical properties of the crustal rocks and the presence of liquid water (Bucher & Grapes, 2011). During brittle deformation rocks break and fracture in response to applied stress and the created fractures fill with water. The fractures in crustal rocks above the brittle-ductile transition are well-connected and form a permeable fractured network (Fig. 8c). The water in the fractured system is under hydrostatic pressure. For instance, the hydrostatic pressure operating on water in an extension fracture at 10 km depth is about 100 MPa (Bucher & Grapes, 2011).

Another consequence of this process is the abrupt rise of the temperature caused by the violent impacts (Segura et al., 2002; Osinski et al., 2022). It would have made any ice layer (permafrost) melt instantly, considering that the typical maximum pressures and temperatures are in the order of 100 GPa and several tens of thousands of degrees at the point of the impact (Bucher & Grapes, 2011). Segura et al. (2002) show that heating from the hot ejecta would mobilize ground ice and rains would locally recharge the aquifer, i.e., the groundwater reservoir.

The immediate response to the immense pressure created at that moment would have been the rapid uprising of the super pressurized hot-water through weak zones in the rock cavities (Fig. 8c). This could be the origin of the scattered and chaotic rocky terrain (Fig. 8d) found either inside some of the craters or in chaotic depressions. These violent outbursts would have been similar to geothermal water geysers on Earth, erupting inside the crater and up to the atmosphere.

Based on lithological, hydrological, and physical properties, Wright et al. (2024) claimed that thin fractures filled with liquid water still exist in an igneous Martian mid-crust. The thickness of the water reservoir is about 1 km to 2 km in a 10 km-thick porous crust. The authors concluded that this volume of liquid water represents more than the capacity commonly proposed for the ancient Martian Ocean. This proves that great volumes of liquid water could have been stored in subsurface and would have erupted catastrophically due to the impact-induced lithospheric flexure mechanism.

In addition, the formation of impact craters could have led to the formation of lakes if the groundwater table was penetrated, even in the presence of a thick permafrost layer or cryosphere (Newsom, 2010).

Finally, those impact craters or basins would have been filled with liquid water, making them terrestrial-like lakes (Fig. 8d). Once a rising lake overtopped its basin rims, spillover could have caused rapid erosion, since the groundwater source wouldn't have been exhausted for a long period of time thereafter (according to Segura et al. (2002) a 250-km-diameter impact event may free 50 m of water). The lakes' diameter varied from approx. 20 km to more than 200 km in the study areas; the depth average was approx. 2 km; and they were mostly circular-shape (following the circumference of the original impact craters).

The result of the continuous groundwater supply, the overflowing lake and the rapid rim erosion would have been the basin-breach, leading to the release of a huge volume of water (spillway) and the catastrophic excavation of an outlet valley, i.e., the megaflow channel (Fig. 8d') (O'Connor & Costa, 2004). That corresponds to a megaflood event, which could have occurred in several lakes simultaneously.

The formation of canyons carved in the Martian bedrock was due to the flow convergence of those megafloods, creating waterfalls or cataracts. The duration of the floods varied in the order of a few months (Lapotre et al., 2016). The canyon width was mainly controlled by the floods' discharges; discharges from all the Martian flood

channels would have totaled 10^8 to 10^9 m^3/s (similar to ocean currents on Earth), and total released reservoir volumes of 10^5 to 10^7 km^3 of water (Baker, 2009).

In the study areas, every impact crater and depression paleolake was responsible of at least one megaflood event. If most of these paleolakes were catastrophically breached approximately at the same time, this would have produced numerous megafloods resulting in a cataclysmic global event. The landscape would have been profoundly reshaped, with extreme erosion rates creating deep valleys, canyons and channels, violent debris flows devastating entire environments and significant atmospheric and hydrological changes.

The terminal phase of the megafloods would have been the discharges at the northern seas, e.g., Chryse and Acidalia Planitias. The low and relatively smooth relief of those northern plains indicate an ancient shallow marine basin, that would have received large amounts of flood sediments. The existence of an ancient Martian Ocean, the so-called Oceanus Borealis, is still under debate (Baker et al., 1991; Baker et al., 2000; Parker et al., 2010).

4.3. The Lake Bonneville flood: a comparison

Shroder et al. (2016) show how the closed tectonic basin Lake Bonneville, the Pleistocene predecessor to Great Salt Lake (O'Connor et al., 2020) in northwest Utah (USA), overflowed and generated a massive megaflood event, creating a megaflow channel running to the North, into modern-day Idaho. It was the largest lake to release a megaflood during the last glacial maximum (O'Connor et al., 2020). Lake Bonneville's flood outlet is located at the Red Rock Pass and the overflow threshold (Zenda threshold) was on the crest of the Marsh Creek (Fig. 9a). Maximum flood-discharge was about 1×10^6 m^3 s^{-1} (= 1 Sverdrup) and the duration of the flood was less than a year, with a flood channel of approx. 100 m in depth and 100-200 m wide. The continual rise of the lake led to failure of the Marsh Creek dam and the catastrophic flooding. This megaflood stripped soil from a 5-kilometer-wide area and carved immense cataracts (e.g., O'Connor, 1993).

Several mass movement deposits are found alongside the terraces of the flood's outlet area, such as hummocky topography, displaced blocks, rotated and deformed sedimentary blocks, altered drainage, slide scarps and slip surface (Shroder et al., 2016). The mechanism of failure linked to the deposition of older slide mass

could have been some tectonic deformation, while younger slide mass failure was caused by removal of lateral support and dewatering of the landslide materials (Shroder et al., 2016). According to the authors, the Lake Bonneville continued overflowing across the Red Rock Pass threshold for about 3000 years, due to a positive water balance after the flood.

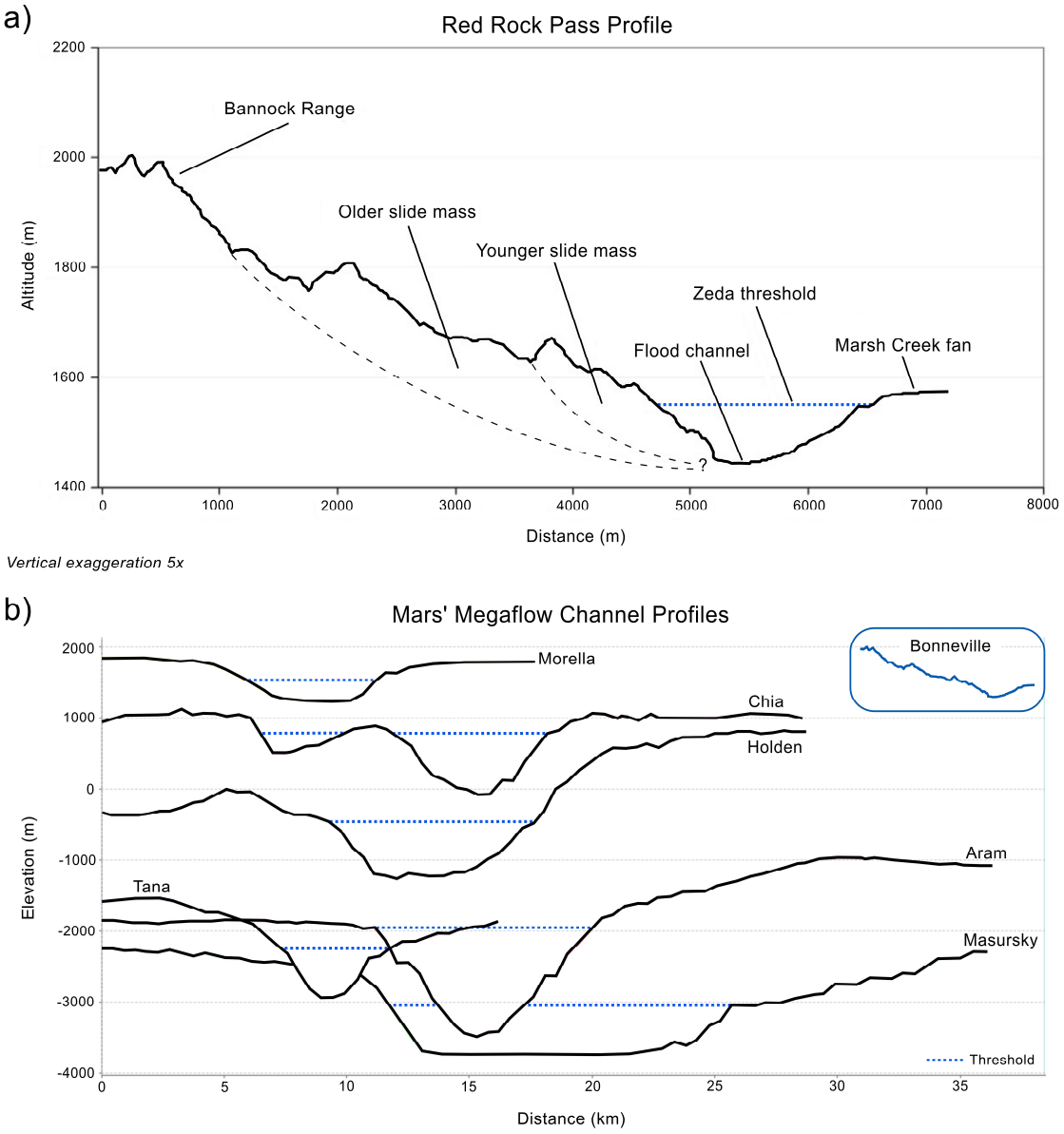


Fig. 9. Comparison of topographic profiles at the basin-breach zone (basin rim) on Earth and Mars. (a) the Red Rock Pass profile (Lake Bonneville's outlet, USA), modified from Shroder et al. (2016); and (b) Mars' megaflow channel profiles, obtained with daytime temperature images (MOLA 128ppd Elevation) at the JMARS software. Note the Bonneville channel profile in the upper right corner, drawn in the same scale for comparison.

Figure 9b shows the basin-breach zone's elevation profiles of some of the Martian megaflow channels in the study areas. These channels vary from ~4 km to ~15 km-wide and their depths vary from ~250 m to more than 1000 m at the basin-breach zone, many times larger than the Bonneville's flood channel; despite that, they resemble similar terrestrial U-shape valleys. For instance, Tana megaflow channel, the outlet of Galilaei paleolake, is one of the smallest flood channels, yet it is at least 7 times deeper and 3 times wider than the Bonneville's flood channel, which is the largest Pleistocene megaflood of North America (O'Connor et al., 2020). Peak flood discharge in Tana channel ranged from 1.5 to 4.7 × 10^7 m^3 s^{-1} (= 15–47 Sverdrup) (Coleman, 2015). Others like Aram megaflow channel (Aram paleolake outlet, Fig. 5b) is ~10 km-wide and almost 2 km deep, with peak discharge of 2.75 × 10^8 m^3 s^{-1} (= 275 Sverdrup) (Howard, 2009). According to Howard (2009), Aram channel was sculped by a single megaflood event; the same is estimated for each of the megaflow channels. It is clear that these Martian megafloods surpassed many times the magnitude of the ice-age megafloods on Earth.

5. Conclusions

We depicted a conceptual model which seeks to explain the overwhelming geological evidence for megafloods on Mars. This model is based on a four-step premise: (i) meteorite impacts were directly connected to groundwater outbursts inside impact craters and depressions; (ii) impact-induced lithospheric flexure generated superlithostatic and hydrostatic pressures in water-filled rock cavities within Mars' upper crust; (iii) impact craters and depressions flooded within months, forming large closed lakes; (iv) basin-breach triggering mechanism took place in the lakes as the water overtopped the basins rims, and spillover caused rapid erosion within days to weeks, producing massive catastrophic outflows.

The proposed lithospheric flexure mechanism differs considerably from terrestrial analogues. Yet, it may have operated in a comparable manner on Earth during the late heavy bombardment period, although evidence would likely be restricted to the early Archean rock record. Fundamental differences would reside in atmospheric and crustal dynamics, which evolved distinctly on Earth and were absent or limited on Mars.

The destructive power of the Martian lakes megafloods was not necessarily greater than that recorded on Earth. Reduced gravity might have influenced flow intensity, as Martian hydraulic regimes were likely dominated by suspended load rather than bedload transport. In other words, even though discharge magnitudes were many times greater in the megaflow channels, the geomorphic impact may have produced landscape degradation comparable to that observed on Earth.

Evidence indicates that the heavy bombardment period played a central role in shaping the ancient Martian surface. This extraordinary episode represents a major environmental disturbance and provides key insights into the evolution of water on the Red Planet through time. Terrestrial analogues, such as Pleistocene Lake Bonneville in North America, reinforce the value of an interplanetary comparative framework. Accordingly, this study underscores the relevance of an alternative megaflood model from a neocatastrophic perspective and highlights the need for further investigation of impact-driven hydrological processes on early Mars. Ultimately, Martian megafloods remain a distinctive geological chapter in the history of our Solar System.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors thank the Postgraduate Program in Geology of the Universidade Federal de Santa Catarina (PPGGeo/UFSC) for all the available resources for this work. R.S. thanks the Brazilian Foundation CAPES for the financial support. M.H. acknowledges Brazilian agency CNPq for personal study grant (PQ-SR 307324/23-0).

Data availability

The datasets supporting the results of this study are publicly available through Google Earth Pro, Google Mars, the Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) archive hosted by NASA Goddard Space Flight Center and the Orbital Data Explorer (ODE) provided by the Planetary Data System Geoscience Node.

Authorship contribution statement

Robert Sauer: Writing – original draft, Visualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Resources, Conceptualization. **Michael Holz:** Writing – review & editing, Validation, Visualization, Supervision, Formal analysis.

References

Ager, D.V., 1981. The Nature of the Stratigraphical Record (2nd ed.). Swansea: Wiley. 122 pp.

Ager, D.V., 1993. The New Catastrophism: The importance of the rare event in geological history (1st ed.). Cambridge University Press. 252 pp.

Andrews-Hanna, J.C., Lewis, K.W., 2011. Early Mars hydrology: 2. Hydrological evolution in the Noachian and Hesperian epochs. Journal of Geophysical Research 116 (2). https://doi.org/10.1029/2010JE003709

Baker, V.R., Milton, D.J., 1974. Erosion by Catastrophic floods on Mars and Earth. Icarus 23 (1), 27-41. https://doi.org/10.1016/0019-1035(74)90101-8

Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., Kargel, J.S., Komatsu, G., Kale, V.S., 1991. Ancient oceans, ice sheets and hydrological cycle on Mars. Nature 352, 589-594. https://doi.org/10.1038/352589a0

Baker, V.R., Strom, R.G., Dohm, J.M., Gulick, V.C., Kargel, J.S., Komatsu, G., Ori, G.G., Rice, J.W., 2000. Mars' Oceanus Borealis, Ancient Glaciers, and the MEGAOUTFLO Hypothesis. Lunar and Planetary Science XXXI. 20000080723

Baker, V.R., 2009. Megafloods and global paleoenvironmental change on Mars and Earth. The Geological Society of America 453, 25-36. https://doi.org/10.1130/2009.453(03)

Baker, V.R., 2014. Terrestrial analogs, planetary geology, and the nature of geological reasoning. Planetary and Space Science 95, 5-10. https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.10.008

Baker, V.R., Hamilton, C.W., Burr, D.M., Gulick, V.C., Komatsu, G., Luo, W., Rice Jr., J.W., Rodriguez, J.A.P., 2015. Fluvial geomorphology on Earth-like planetary surfaces: a review. Geomorphology 245, 149-182. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.002

Bucher, K., Grapes, R., 2011. Petrogenesis of Metamorphic Rocks (8th ed.). Springer. 441 pp.

Cabrol, N.A., Grin, E.A., 2010. Lakes on Mars (1st ed.). Elsevier. 410 pp.

Carr, M.H., Head III, J.W., 2010. Geologic history of Mars. Earth and Planetary Science Letters 294 (3-4), 185-203. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.06.042

Carr, M. H., Head, J.W., 2010. Acquisition and history of water on Mars. In: Cabrol, N.A., Grin, E.A. Lakes on Mars. Elsevier, pp. 31-67.

Carling, P.A., 2017. Catastrophic Deposition of Gravel from Outbreak Floods. In: Tsutsumi, D., Laronne, J.B. Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters. Wiley-Blackwell. 832 pp.

Coleman, N. M., 2015. Hydrographs of a Martian flood from the breach of Galilaei Crater. Geomorphology 236, 90-108. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.034

French, B.M., 1998. Traces of Catastrophe: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston. 120 pp.

Gallagher, C., Butcher, F.E.G., Balme, M., Smith, I., Arnold, N., 2021. Landforms indicative of regional warm based glaciation, Phlegra Montes, Mars. Icarus 355, 114173. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114173

Harrison, K.P., Chapman, M.G., 2010. Episodic ponding and outburst flooding associated with chaotic terrains in Valles Marineris. In: Cabrol, N.A., Grin, E.A. Lakes on Mars. Elsevier, pp. 163-194.

Harrison, K.P., Grimm, R.E., 2005. Groundwater-controlled valley networks and the decline of surface runoff on early Mars. Journal of Geophysical Research 110 (12). https://doi.org/10.1029/2005JE002455

Howard, D. A., 2009. Modeled catastrophic outflow at Aram Chaos channel, Mars. Lunar and Planetary Science Conference 40, Abstract 2179.

Hsü, K.J., 1983. Actualistic Catastrophism. Address of the retiring President of the International Association of Sedimentologists. Sedimentology 30 (1), 3-9. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1983.tb00646.x

Hsü, K.J., 1990. Actualistic catastrophism and global change. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 89 (3), 309-313. https://doi.org/10.1016/0921-8181(90)90027-A

Komar, P.D., 1983. Shapes of streamlined islands on Earth and Mars: Experiments and analysis of the minimum-drag form. Geology 11 (11), 651-654. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1983)11<651:SOSIOE>2.0.CO;2

Lapotre, M.G.A., Lamb, M.P., Williams, R.M.E., 2016. Canyon formation constraints on the discharge of catastrophic outburst floods of Earth and Mars. Journal of Geophysical Research: Planets 121 (7), 1232-1263. https://doi.org/10.1002/2016JE005061

Newsom, H.E., 2010. Heated lakes on Mars. In: Cabrol, N.A., Grin, E.A. Lakes on Mars. Elsevier, pp. 93-110.

O'Connor, J.E., Costa, J.E., 2004. The world's largest floods, past and present—Their causes and magnitudes. U.S. Geological Survey Circular 1254, 13 pp.

O'Connor, J.E., Clague, J.J., Walder, J.S., Manville, V., Beebee, R.A., 2013. Outburst Floods. Treatise on Geomorphology. Editor(s): John F. Shroder. Academic Press, pp. 475-510.

O'Connor, J.E., Baker, V.R., Waitt, R.B., Smith, L.N., Cannon, C.M., George, D.L., Delinger, R.P., 2020. The Missoula and Bonneville floods—A review of ice-age megafloods in the Columbia River basin. Earth-Science Reviews 208, 103181. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103181

Osinski, G.R., Grieve, R.A.F., Ferrière, L., Losiak, A., Pickersgill, A.E., Cavosie, A.J., Hibbard, S.M., Hill, P.J.A., Bermudez, J.J., Marion, C.L., Newman, J.D., Simpson, S.L., 2022. Impact Earth: a review of the terrestrial impact record. Earth-Science Reviews 232, 104112. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104112

Pacifici, A., Komatsu, G., Pondrelli, M., 2009. Geological evolution of Ares Vallis on Mars: Formation by multiple events of catastrophic flooding, glacial and periglacial processes. Icarus 202 (1), 66-77. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.02.029

Palumbo, A.M., Head, J.W., 2020. Groundwater release on Early Mars: utilizing models and proposed evidence for groundwater release to estimate the required climate and subsurface water budget. Advanced Earth and Space Science: Geophysical Research Letters 47 (8). https://doi.org/10.1029/2020GL087230

Parker, T.J., Grant, J.A., Franklin, B.J., 2010. The Northern plains: A Martian oceanic basin? In: Cabrol, N.A., Grin, E.A. Lakes on Mars. Elsevier, pp. 249-273. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52854-4.00009-X

Robinson, M.S., Tanaka, K.L., 1990. Magnitude of a catastrophic flood event at Kasei Valles, Mars. Geology 18 (9), 902-905. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0902:MOACFE>2.3.CO;2

Rodriguez, J.A.P., Kargel, J.S., Baker, V.R., Gulick, V.C., Berman, D.C., Fairén, A.G., Linares, R., Zarroca, M., Yan, J., Miyamoto, H., Glines, N., 2015. Martian outflow channels: how did their source aquifers form, and why did they drain so rapidly? Nature: Scientific Reports 5 (13404). https://doi.org/10.1038/srep13404

Scott, D.H., Carr, M.H., 1978. Geologic map of Mars. Map 1-1083, U. S. Geological Survey, scale 1:25,000,000.

Segura, T.L., Toon, O.B., Colaprete, A., Zahnle, K., 2002. Environmental Effects of Large Impacts on Mars. Science 298 (5600), 1977-1980. https://doi.org/10.1126/science.1073586

Shroder, J. F., Cornwell, K., Oviatt, C. G., Lowndes, T. C., 2016. Landslides, Alluvial Fans, and Dam Failure at Red Rock Pass: The Outlet of Lake Bonneville. In: Oviatt, C. G., and Shroder, J. F. Lake Bonneville: A Scientific Update. Developments in Earth Surface Processes 20, 75-87. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63590-7.00004-4

Tanaka, K.L., 1986. The stratigraphy of Mars. Proceedings of the Seventeenth Lunar and Planetary Science Conference, Part 1. Journal of Geophysical Research 91 (13), 139-158. https://doi.org/10.1029/JB091iB13p0E139

Tanaka, K.L., Skinner, J.A., Dohm Jr., J.M., Irwin, R.P., Kolb Iii, E.J., Fortezzo, C.M., Platz, T., Michael, G.G., Hare, T.M., 2014. Geologic map of Mars. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292, scale 1:20,000,000.

Turbet, M., Forget, F., Svetsov, V., Popova, O., Gillmann, C., Karatekin, O., Wallemacq, Q., Head, J.W., Wordsworth, R., 2017. Catastrophic events: possible solutions to the early Mars enigma(s)? In 6th Mars Atmosphere Modelling and Observation (MAMO) Workshop 4304.

Wang, C.Y., Manga, M., Wong, A., 2005. Floods on Mars released from groundwater by impact. Icarus 175 (2), 551-555. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.12.003

Watts, A.B., Cochran, J.R., Selzer, G., 1975. Gravity Anomalies and Flexure of the Lithosphere: a three-dimensional study of the Great Meteor Seamount, Northeast Atlantic. Journal of Geophysical Research 80 (11), 1391-1398. https://doi.org/10.1029/JB080i011p01391

Westbroek, H.H., Stewart, R.R., 1996. The formation, morphology, and economic potential of meteorite impact craters. CREWES Research Report 8.

Wilson, L., Ghatan, G.J., Head III, J.W., Mitchell, K.L., 2004. Mars outflow channels: A reappraisal of the estimation of water flow velocities from water depths, regional slopes, and channel floor properties. Journal of Geophysical Research 109 (9). https://doi.org/10.1029/2004JE002281

Wright, V., Morzfelda, M., Manga, M., 2024. Liquid water in the Martian mid-crust. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 121 (35). https://doi.org/10.1073/pnas.2409983121

REFERÊNCIAS

ABRIL-HERNÁNDEZ, J. M.; PERIÁÑEZ, R.; O'CONNOR, J. E.; GARCIA-CASTELLANOS, D. Computational Fluid Dynamics simulations of the Late Pleistocene Lake Bonneville Flood. **Journal of Hydrology**, Sevilla, v. 561, p. 1-15, 2018.

AGER, Derek V. **The Nature of the Stratigraphical Record**. 2 ed. Swansea: Wiley, 1981. 122 p.

AGER, Derek V. **The New Catastrophism**: the importance of the rare event in geological history. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 252 p.

ALHO, P.; BAKER, V. R.; SMITH, L. N. Paleohydraulic reconstruction of the largest glacial Lake Missoula drainings. **Quaternary Science Reviews**, Tucson, v. 29, n. 23-24, p. 3067-3078, 2010.

AMY, L.; DORRELL, R. Equilibrium sediment transport, grade and discharge for suspended-load-dominated flows on Earth, Mars and Titan. **Icarus**, Dublin, v. 360, n. 15, p. 1-17, 2021.

ANDREWS-HANNA, J. C.; PHILLIPS, R. J. Hydrological modeling of outflow channels and chaos regions on Mars. **Journal of Geophysical Research: Planets**, St. Louis, v. 112, n. 8, p. 1-14, 2007.

ANDREWS-HANNA, J. C.; LEWIS, K. W. Early Mars hydrology: 2. Hydrological evolution in the Noachian and Hesperian epochs. **Journal of Geophysical Research**, Golden, v. 116, n. 2, p. 1-20, 2011.

BAKER, Victor R. Erosional forms and processes for the catastrophic Pleistocene Missoula floods in eastern Washington. *In*: Morisawa, M., ed. **Fluvial Geomorphology**, New York, v. 4, p. 123-148, 1973.

BAKER, V. R.; STROM, R. G.; GULICK, V. C.; KARGEL, J. S.; KOMATSU, G.; KALE, V. S. Ancient oceans, ice sheets, and the hydrological cycle on Mars. **Nature**, Tucson, v. 352, p. 589-594, 1991.

BAKER, Victor R. Catastrophism and uniformitarianism: logical roots and current relevance in geology. *In*: Blundell, D.J. e Scott, A.C. (eds). Lyell: the past is the key to the present. **Geological Society**, Special Publications, London, v. 143, p. 171-182, 1998.

BAKER, V. R.; BJORNSTAD, B. N.; GAYLORD, D. R.; SMITH, G. A.; MEYER, S. E.; ALHO, P.; BRECKENRIDGE, R. M.; SWEENEY, M. R.; ZREDA, M. Pleistocene megaflood landscapes of the Channeled Scabland. *In*: Lewis, R.S., Schmidt, K.L., eds. Exploring the Geology of the Inland Northwest: **Geological Society of America Field Guide**, v. 41, p. 1-73, 2016.

BAKER, Victor R. Megafloods and global paleoenvironmental change on Mars and Earth. **The Geological Society of America**, v. 453, p. 25-37, 2009.

BAKER, V. R.; MILTON, D. J. Erosion by Catastrophic floods on Mars and Earth. **Icarus**, Tucson, v. 23, n. 1, p. 27-41, 1974.

BAKER, V. R.; HAMILTON, C. W.; BURR, D. M.; GULICK, V. C.; KOMATSU, G.; LUO, W.; RICE, J. W. Jr.; RODRIGUEZ, J. A. P. Fluvial geomorphology on Earth-like planetary surfaces: a review. **Geomorphology**, Tucson, v. 245, p. 149-182, 2015.

BERMAN, D. C.; HARTMANN, W. K. Recent fluvial, volcanic, and tectonic activity on the Cerberus Plains of Mars. **Icarus**, v. 159, n. 1, p. 1-17, 2002.

BRAAT, L.; BRÜCKNER, M.; SEFTON-NASH, E.; LAMB, M. Gravity-driven differences in fluvial sediment transport fluxes on Mars and Earth. **EarthArXiv**, Noordwijk, v. 129, n. 2, p. 1-31, 2023.

BRETZ, J. Harlen. The Channeled Scabland of the Columbia Plateau. **Journal of Geology**, Chicago, v. 31, n. 8, p. 617-649, 1923.

BUCHER, K.; GRAPES, R. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks**. 8 ed. Freiburg: Springer, 2011. 441 p.

BURR, Devon M. Sedimentology in a reduced-gravity environment: Submarine analogs for streamlined forms on Mars. **Geology**, USA, v. 39, n. 7, p. 703-704, 2011.

BURR, D. M.; GRIER, J. A.; MCEWEN, A. S.; KESZTHELYI, L. P. Repeated aqueous flooding from the Cerberus Fossae: evidence for very recently extant, deep ground-water on Mars. **Icarus**, v. 159, n. 1, p. 53-73, 2002.

BURR, D. M.; EMERY, J. P.; LORENZ, R. D.; COLLINS, G. C.; CARLING, P. A. Sediment transport by liquid surficial flow: Application to Titan. **Icarus**, Mt. View, v. 181, n. 1, p. 235-242, 2006.

BURR, Devon M. Palaeoflood-generating mechanisms on Earth, Mars, and Titan. **Global and Planetary Change**, Knoxville, v. 70, n. 1-4, p. 5-13, 2010.

CABROL, N. A.; GRIN, E. A. (eds). **Lakes on Mars**. 1 ed. Oxford: Elsevier, 2010. 410 p.

CARR, M. H.; SAUNDERS, R. S.; STROM, R. G.; WILHELMS, D. E. **The Geology of the Terrestrial Planets**. Washington: NASA SP-469, 1984. 322 p.

CARR, M. H.; HEAD III, J. W. Geologic history of Mars. **Earth and Planetary Science Letters**, Menlo Park, v. 294, n. 3-4, p. 185-203, 2010.

CARR, M. H.; HEAD, J. W. Acquisition and history of water on Mars. *In*: Cabrol, N. A.; Grin, E. A. (eds). **Lakes on Mars**. 1 ed. Oxford: Elsevier, p. 31-67, 2010.

CARLING, Paul A. Catastrophic Deposition of Gravel from Outbreak Floods. *In*: Tsutsumi, D.; Laronne, J. B. **Gravel-Bed Rivers**: Processes and Disasters. Kyoto: Wiley-Blackwell, p. 299-327, 2017.

CARLING, P. A.; FAN, X. Particle comminution defines megaflood and superflood energetics. **Earth-Science Reviews**, Chengdu, v. 204, p. 1-11, 2020.

CARLING, P. A.; BURR, D. M.; JOHNSEN, T. F.; BRENNAND, T. A. A review of open-channel megaflood depositional landforms on Earth and Mars. *In*: Burr, D. M.; Carling, P. A.; Baker, V. R. (eds). **Megaflooding on Earth and Mars**. 1 ed. Cambridge: Cambridge University Press, p. 33-49, 2009.

CHAPMAN, C. R.; MORRISON, D. Uniformitarianism and Catastrophism. *In*: Chapman, C. R.; Morrison, D. **Cosmic Catastrophes**. New York, Plenum Press, p. 27-41, 1989.

CHRISTENSEN, P. R.; GORELICK, N. S.; MEHALL, G. L.; MURRAY, K. C. **THEMIS Public Data Releases**. Planetary Data System node, Arizona State University, <http://themis-data.asu.edu>.

CHRISTENSEN, P. R.; JAKOSKY, B. M.; KIEFFER, H. H.; MALIN, M. C.; McSWEEN, H. Y. Jr.; NEALSON, K.; MEHALL, G. L.; SILVERMAN, S. H.; FERRY, S.; CAPLINGER, M.; RAVINE, M. The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission, **Space Science Reviews**, v. 110, p. 85-130, 2004.

CLAGUE, J. J.; ROBERTS, N. J.; MILLER, B.; MENOUNOS, B.; GOEHRING, B. A huge flood in the Fraser River Valley, British Columbia, near the Pleistocene Termination. **Geomorphology**, Burnaby, v. 374, p. 1-17, 2021.

DAI, F. C.; LEE, C. F.; DENG, J. H.; THAM, L. G. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China. **Geomorphology**, Beijing, v. 65, n. 3-4, p. 205-221, 2005.

DOTT, Robert H. Jr. 1982 SEPM Presidential Address: Episodic Sedimentation—How normal is average? How rare is rare? Does it matter? **Journal of Sedimentary Petrology**, Madison, v. 53, n. 1, p. 5-23, 1983.

DOTT, R. H. JR.; BOURGEOIS, J. Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences. **Geological Society of America Bulletin**, Madison, v. 93, p. 663-680, 1982.

FAURE, G.; MENSING, T. M. **Introduction to Planetary Science**: the geological perspective. 1 ed. Dordrecht: Springer, 2007. 530 p.

FRENCH, Bevan M. **Traces of Catastrophe**: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. LPI Contribution, n. 954, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. 120 p.

GALLAGHER, C.; BUTCHER, F. E. G.; BALME, M.; SMITH, I.; ARNOLD, N. Landforms indicative of regional warm based glaciation, Phlegra Montes, Mars. **Icarus**, Dublin, v. 355, p. 1-20, 2021.

GARCIA-CASTELLANOS, D.; O'CONNOR, J. E. Outburst floods provide erodibility estimates consistent with long-term landscape evolution. **Nature: Scientific Reports**, v. 8, p. 1-9, 2018.

GOLOMBEK, M. P.; PHILLIPS, R. J. Mars tectonics. *In*: Watters, T. R.; Schultz, R. A. **Planetary Tectonics**. 1 ed. Cambridge Planetary Science, Cambridge University Press, p. 183-232, 2010.

GREELEY, Ronald. **Introduction to Planetary Geomorphology**. 1 ed. New York: Cambridge University Press, 2013. 254 p.

HARMS, J. C.; SOUTHARD, J. B.; SPEARING, D. R.; WALKER, R. G. Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences. **Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Short Course**, n. 2, Dallas, 1975.

HSÜ, Kenneth J. Actualistic Catastrophism. Address of the retiring President of the International Association of Sedimentologists. **Sedimentology**, v. 30, n. 1, p. 3-9, 1983.

HSÜ, Kenneth J. Actualistic catastrophism and global change. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 89, n. 3, p. 309-313, 1990.

HARRISON, K. P.; CHAPMAN, M. G. Episodic ponding and outburst flooding associated with chaotic terrains in Valles Marineris. *In*: Cabrol, N. A.; Grin, E. A. (eds). **Lakes on Mars**. 1 ed. Oxford: Elsevier, p. 163-194, 2010.

HARRISON, K. P.; GRIMM, R. E. Groundwater-controlled valley networks and the decline of surface runoff on early Mars. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. 1-17, 2005.

HARRISON, K. P.; GRIMM, R. E. Multiple flooding events in Martian outflow channels. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 1-11, 2008.

JAUMANN, R.; TIRSCH, D.; ADELI, S.; BAHIA, R.; MICHAEL, G.; LE DEIT, L.; GRAU GALOFRE, A.; HEAD, J.; BOHACEK, E.; GROSS, C.; WALTER, S. H. G.; HIESINGER, H. Geological Record of Water and Wind Processes on Mars as Observed by the Mars Express High Resolution Stereo Camera. **Space Science Reviews**, v. 220, n. 45, p. 1-51, 2024.

KENKMANN, T.; WULF, G. Impact Cratering. *In*: Rossi, A. P.; Gasselt, S. van. (eds). **Planetary Geology**. 1 ed. Springer Praxis Books, p. 123-145, 2018.

KING, Clarence. Catastrophism and Evolution. **The American Naturalist**, v. 11, n. 8, p. 449-470, 1877.

KOMAR, Paul D. Shapes of streamlined islands on Earth and Mars: Experiments and analysis of the minimum-drag form. **Geology**, Corvallis, v. 11, p. 651-654, 1983.

KORUP, O.; TWEED, F. Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain. **Quaternary Science Reviews**, Davos, v. 26, n. 25-28, p. 3406-3422, 2007.

KUHN, Nikolaus. Experiments in Reduced Gravity: Sediment Settling on Mars. 1 ed. **Elsevier**, 2015. 50 p.

KUHN, N. J.; KUHN, B.; GARTMANN, A. Experimental investigation of gravity effects on sediment sorting on Mars. **Geophysical Research Abstracts**, v. 18, 2016.

LACZNIAK, Dara. **Introduction to Planetary Geology**. s.d. Disponível em: https://pressbooks.cuny.edu/introplanetarygeology/. Acesso em: jan. 2026.

LAPOTRE, M. G. A.; LAMB, M.P.; WILLIAMS, R. M. E. Canyon formation constraints on the discharge of catastrophic outburst floods of Earth and Mars. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 121, p. 1232-1263, 2016.

LOGET, N.; VAN DEN DRIESSCHE, J. On the origin of the Strait of Gibraltar. **Sedimentary Geology**, Beaulieu, v. 188/189, p. 341-356, 2006.

MA, J.; CHEN, J.; XU, C. Sedimentary records of giant landslide-dam breach events in western Sichuan, China. **Frontiers in Earth Science**, Beijing, v. 12, 2024.

MCSWEEN, H. Y. JR.; MOERSCH, J. E.; BURR, D. M.; DUNNE, W. M.; EMERY, J. P.; KAH, L. C.; E MCCANTA, M. C. **Planetary Geoscience**. 1 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 340 p.

MELOSH, H. J.; IVANOV, B. A. Impact crater collapse. **Annual Review of Earth and Planetary Science**, Tucson, v. 27, p. 385-415, 1999.

MICALLEF, A.; CAMERLENGHI, A.; GARCIA-CASTELLANOS, D.; OTERO, D. C.; GUTSCHER, M. A.; BARRECA, G.; SPATOLA, D.; FACCHIN, L.; GELETTI, R.; KRASTEL, S.; GROSS, F.; URLAUB, M. Evidence of the Zanclean megaflood in the eastern Mediterranean Basin. **Nature: Scientific Reports**, v. 8, n. 1078, p. 1-8, 2018.

MONDRO, C. A.; FEDO, C. M.; GROTZINGER, J. P.; LAMB, M. P.; GUPTA, S.; DIETRICH, W. E.; BANHAM, S.; WEITZ, C. M.; GASDA, P.; EDGAR, L. A.; RUBIN, D.; BRYK, A. B.; KITE, E. S.; CARAVACA, G.; SCHIEBER, J.; VASAVADA, A. R. Wave ripples formed in ancient, ice-free lakes in Gale crater, Mars. **Science Advances**, Pasadena, v. 11, p. 1-9, 2025.

MOREY, S. M.; HUNTINGTON, K. W.; TURZEWSKI, M. D.; MANGIPUDI, M.; MONTGOMERY, D. R. The erosional and depositional potential of Holocene Tibetan megafloods through the Yarlung Tsangpo Gorge, eastern Himalaya: Insights from 2D hydraulic simulations. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, Seattle, v. 127, p. 1-23, 2022.

MORELAND, E. L.; DEE, S. G.; JIANG, Y.; BISCHOF, G.; MISCHNA, M. A.; HARTIGAN, N.; RUSSEL, J. M.; MOORES, J. E.; SIEBACH, K. L. Seasonal Ice

Cover Could Allow Liquid Lakes to Persist in a Cold Mars Paleoclimate. **Advancing Earth and Space Sciences**, Houston, v. 7, p. 1-19, 2025.

MORRISON, D.; CHAPMAN, C. R. The New Catastrophism. **Skeptical Inquirer**, v. 14, p. 141-152, 1990.

O'CONNOR, Jim E. **Hydrology, Hydraulics, and Geomorphology of the Bonneville Flood**. Geological Society of America Special Paper, v. 274, 1993. 83 p.

O'CONNOR, J. E.; COSTA, J. E. **The world's largest floods, past and present**: Their causes and magnitudes. U.S. Geological Survey Circular, n. 1254, 2004. 13 p.

O'CONNOR, J. E.; CLAGUE, J. J.; WALDER, J. S.; MANVILLE, V.; BEEBEE, R. A. Outburst Floods. *In*: Shroder, J. F. (ed). **Treatise on Geomorphology**, Omaha, Elsevier, Academic Press, v. 9, p. 475-510, 2013.

O'CONNOR, J. E.; BAKER, V. R.; WAITT, R. B.; SMITH, L. N.; CANNON, C. M.; GEORGE, D. L.; DENLINGER, R. P. The Missoula and Bonneville floods—A review of ice-age megafloods in the Columbia River basin. **Earth-Science Reviews**, Portland, v. 208, p. 1-53, 2020.

OSINSKI, G. R.; GRIEVE, R. A. F.; FERRIÈRE, L.; LOSIAK, A.; PICKERSGILL, A. E.; CAVOSIE, A. J.; HIBBARD, S. M.; HILL, P. J. A.; BERMUDEZ, J. J.; MARION, C. L.; NEWMAN, J. D.; SIMPSON, S. L. Impact Earth: a review of the terrestrial impact record. **Earth-Science Reviews**, London, Ontario, v. 232, p. 1-48, 2022.

PACIFICI, A.; KOMATSU, G.; PONDRELLI, M. Geological evolution of Ares Vallis on Mars: formation by multiple events of catastrophic flooding, glacial and periglacial processes. **Icarus**, Viale Pindaro, v. 202, n. 1, p. 60-77, 2009.

PALUMBO, A. M.; HEAD, J. W. Groundwater release on Early Mars: utilizing models and proposed evidence for groundwater release to estimate the required climate and subsurface water budget. **Advancing Earth and Space Science: Geophysical Research Letters**, Providence, v. 47, p. 1-8, 2020.

PARKER, T. J.; GRANT, J. A.; FRANKLIN, B. J. The Northern plains: A Martian oceanic basin? *In*: Cabrol, N.A., Grin, E.A. (eds). **Lakes on Mars**. 1 ed. Oxford: Elsevier, p. 249-273, 2010.

PEPLOW, Mark. How Mars got its rust. ***BioEd Online***. MacMillan Publishers Ltd., 2007.

POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M.; GUILLOT, S. **Princípios de Geologia**: técnicas, modelos e teorias. Tradução: Maria L. V. Lelarge; Pascal F. C. Lelarge; revisão ténica: Rualdo Menegat; Maria L. V. Lelarge. 14 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1017 p.

QUIN, Jamie G. Is most hummocky cross-stratification formed by large-scale ripples? **Sedimentology**, Trondheim, v. 58, n. 6, p. 1414-1433, 2011.

RACKI, Grzegorz. Catastrophism and neocatastrophism versus cosmic hazard: Ager versus Alvarez; Cuvier versus Laplace. **Palaios**, Sosnowiec, v. 30, p. 432-434, 2015.

RODRIGUEZ, J. A. P.; KARGEL, J. S.; BAKER, V. R.; GULICK, V. C.; BERMAN, D. C.; FAIRÉN, A. G.; LINARES, R.; ZARROCA, M.; YAN, J.; MIYAMOTO, H.; GLINES, N. Martian outflow channels: how did their source aquifers form, and why did they drain so rapidly? **Nature: Scientific Reports**, Tucson, v. 5, p. 1-10, 2015.

RODRIGUEZ, J. A. P.; FAIRÉN, A. G.; TANAKA, K. L.; ZARROCA, M.; LINARES, R.; PLATZ, T.; KOMATSU, G.; MIYAMOTO, H.; KARGEL, J. S.; YAN, J.; GULICK, V.; HIGUCHI, K.; BAKER, V. R.; GLINES, N. Tsunami waves extensively resurfaced the shorelines of an early Martian ocean. **Nature: Scientific Reports**, Tucson, v. 6, p. 1-8, 2016.

ROBINSON, M. S.; TANAKA, K. L. Magnitude of a catastrophic flood event at Kasei Valles, Mars. **Geology**, Honolulu, v. 18, p. 902-905, 1990.

RUDOY, Alexei N. Contemporary problems of physical geography: quaternary ice-dammed lakes in the mountains of south Siberia and their influence on the development of intracontinental water run-off systems of north Asia in late Pleistocene. **Boletim TSPU Ed. especial**, Tomsk, n. 2, p. 82-104, 1998.

RUDOY, Alexei N. Glacier-dammed lakes and geological work of glacial superfloods in the Late Pleistocene, Southern Siberia, Altai Mountains. **Quaternary International**, Tomsk, v. 87, p. 119-140, 2002.

SCOTT, D. H.; CARR, M. H. **Geologic map of Mars**. Map 1-1083, U. S. Geological Survey, scale 1:25,000,000, Reston, 1978.

SCOTT, D. H.; TANAKA, K. L. **Geologic map of the western equatorial region of Mars**. U. S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Map I-1802-A, scale 1:15,000,000, 1986.

SEGURA, T. L.; TOON, O. B.; COLAPRETE, A.; ZAHNLE, K. Environmental Effects of Large Impacts on Mars. **Science**, Boulder, v. 298, p. 1977-1980, 2002.

SEGURA, T. L.; McKAY, C. P.; TOON, O. B. An impact-induced, stable, runaway climate on Mars. **Icarus**, Palo Alto, v. 220, n. 1, p. 144-148, 2012.

SMELLIE, John. Subglacial eruptions. Encyclopedia of Volcanoes. **British Antarctic Survey**, p. 403-418, 2000.

SMELLIE, John. Subglacial volcanoes. **Royal Holloway University of London**. Disponível em AntarcticGlaciers.org, 2020.

SUMMERFIELD, Michael A. **Global geomorphology**: An introduction to the study of landforms. 1 ed. Singapore: Longman Scientific & Technical, 1991. 537 p.

SVISTUNOV, M. I.; KURBANOV, R. N.; MURRAY, A. S.; TARATUNINA, N. A.; SEMIKOLENNYK, D. V.; ENTIN, A. L.; DEEV, Y. V.; ZOLNIKOV, I. D.; PANIN, A. V.

Constraining the age of Quaternary megafloods in the Altai Mountains (Russia) using luminescence. **Quaternary Geochronology**, Moscow, v. 73, p. 1-7, 2022.

TANAKA, Kenneth L. The stratigraphy of Mars. Proceedings of the Seventeenth Lunar and Planetary Science Conference, Part 1; **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Flagstaff, v. 91, n. 13, p. 139-158, 1986.

TANAKA, K. L.; SKINNER, J. A.; DOHM, J. M. Jr.; IRWIN, R. P.; KOLB III, E. J.; FORTEZZO, C. M.; PLATZ, T.; MICHAEL, G. G.; HARE, T. M. **Geologic map of Mars**. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292, scale 1:20,000,000, 2014.

TURBET, M.; FORGET, F.; SVETSOV, V.; POPOVA, O.; GILLMANN, C.; KARATEKIN, O.; WALLEMACQ, Q.; HEAD, J. W.; WORDSWORTH, R. Catastrophic events: possible solutions to the early Mars enigma(s)? **6th Mars Atmosphere Modelling and Observation (MAMO) Workshop**, Paris, p. 1-4, 2017.

VITA-FINZI, C.; FORTES, A. DOMINIC. **Planetary Geology**: an introduction. 2 ed. Edinburgh/London: Dunedin, 2013. 217 p.

WANG, C. Y.; MANGA, M.; WONG, A. Floods on Mars released from groundwater by impact. **Icarus**, Berkeley, v. 175, n. 2, p. 551-555, 2005.

WANG, P.; WANG, H.; LIU, T.; HU, G.; QIN, J.; YUAN, R. Sedimentary records of megafloods in the Yarlung Tsangpo Gorge in the eastern Himalaya since the Last Glacial Period. **Quaternary Science Reviews**, Beijing, v. 324, p. 1-17, 2024.

WATTS, A. B.; COCHRAN, J. R.; SELZER, G. Gravity Anomalies and Flexure of the Lithosphere: a three-dimensional study of the Great Meteor Seamount, Northeast Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 11, p. 1391-1398, 1975.

WESTOBY, M. J.; GLASSER, N. F.; BRASINGTON, J.; HAMBREY, M. J.; QUINCEY, D. J.; REYNOLDS, J. M. Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. **Earth-Science Reviews**, Aberystwyth, v. 134, p. 137-159, 2014.

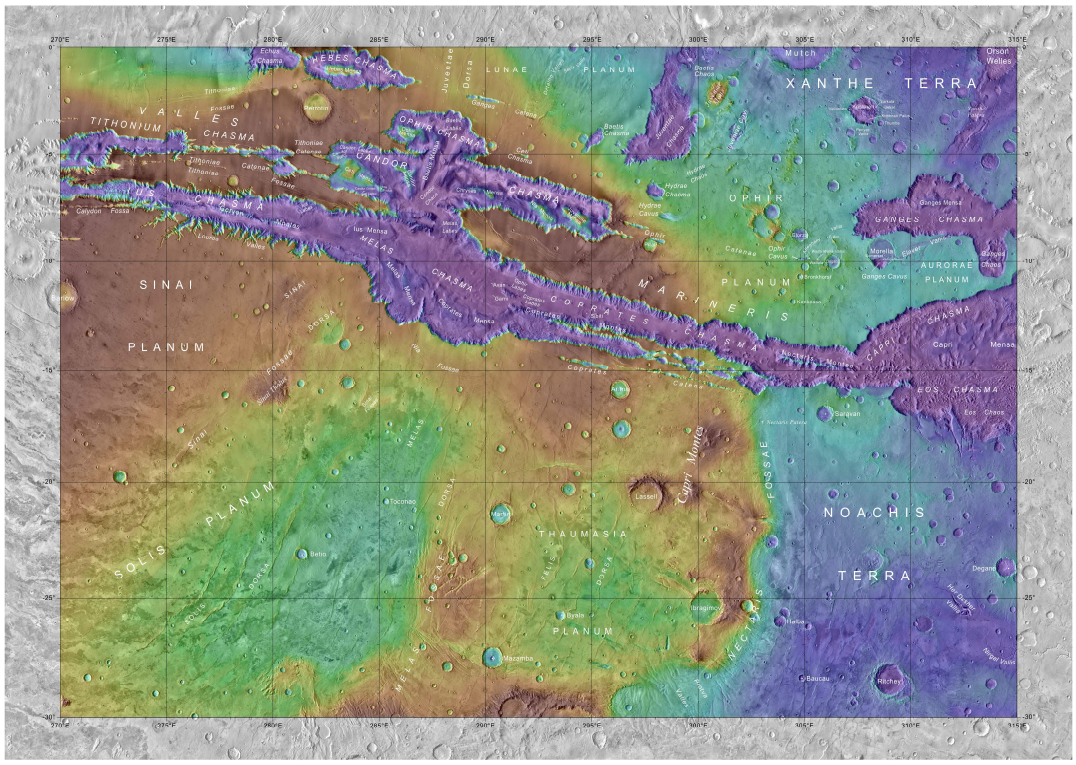
WILSON, L.; GHATAN, G. J.; HEAD III, J. W.; MITCHELL, K. L. Mars outflow channels: A reappraisal of the estimation of water flow velocities from water depths, regional slopes, and channel floor properties. **Journal of Geophysical Research**, Lancaster, v. 109, p. 1-10, 2004.

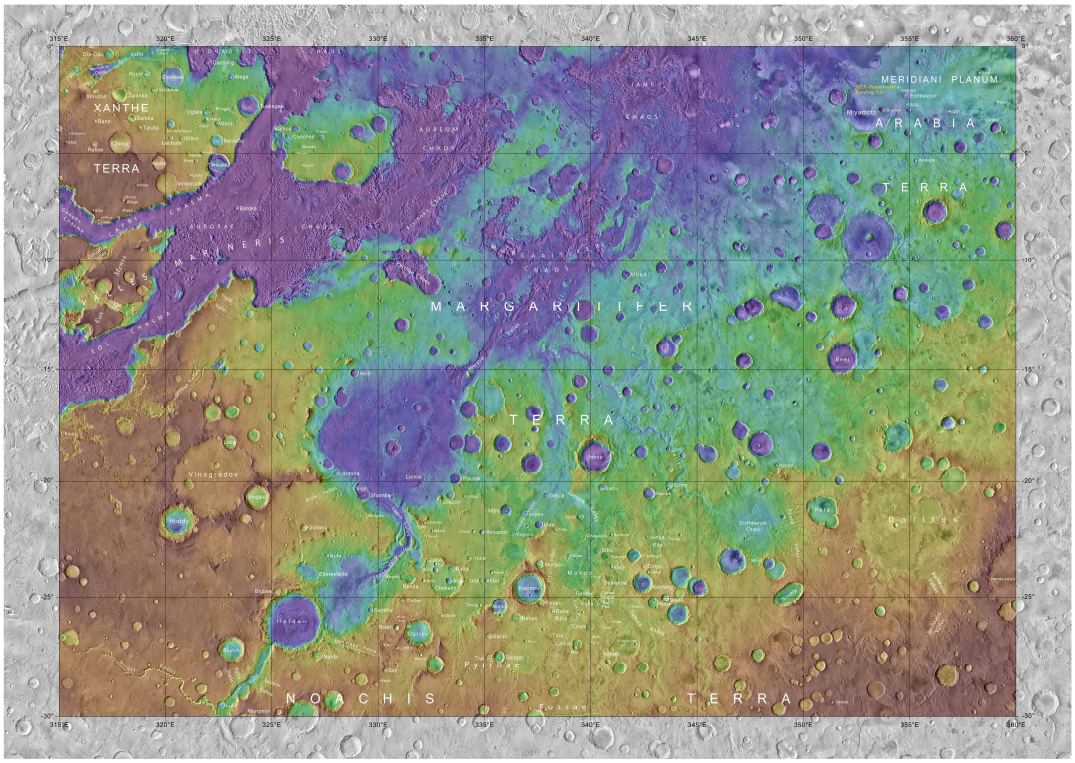
WORSLEY, Peter. The 1996 volcanically induced glacial mega-flood in Iceland—cause and consequence. **Geology Today**, v. 13, n. 6, p. 222-227, 1997.

WRIGHT, V.; MORZFELDA, M.; MANGA, M. Liquid water in the Martian mid-crust. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.**, Minneapolis, v. 121, n. 35, p. 1-3, 2024.

YANG, A.; WANG, H.; LIU, W.; HU, K.; LIU, D.; WU, C.; HU, X. Two megafloods in the middle reach of Yarlung Tsangpo River since Last-glacial period: Evidence from giant bars. **Global and Planetary Change**, Chengdu, v. 208, p. 1-18, 2022.

ANEXOS – QUADRÂNGULOS DA USGS OCUPADOS PELAS ÁREAS DE ESTUDO





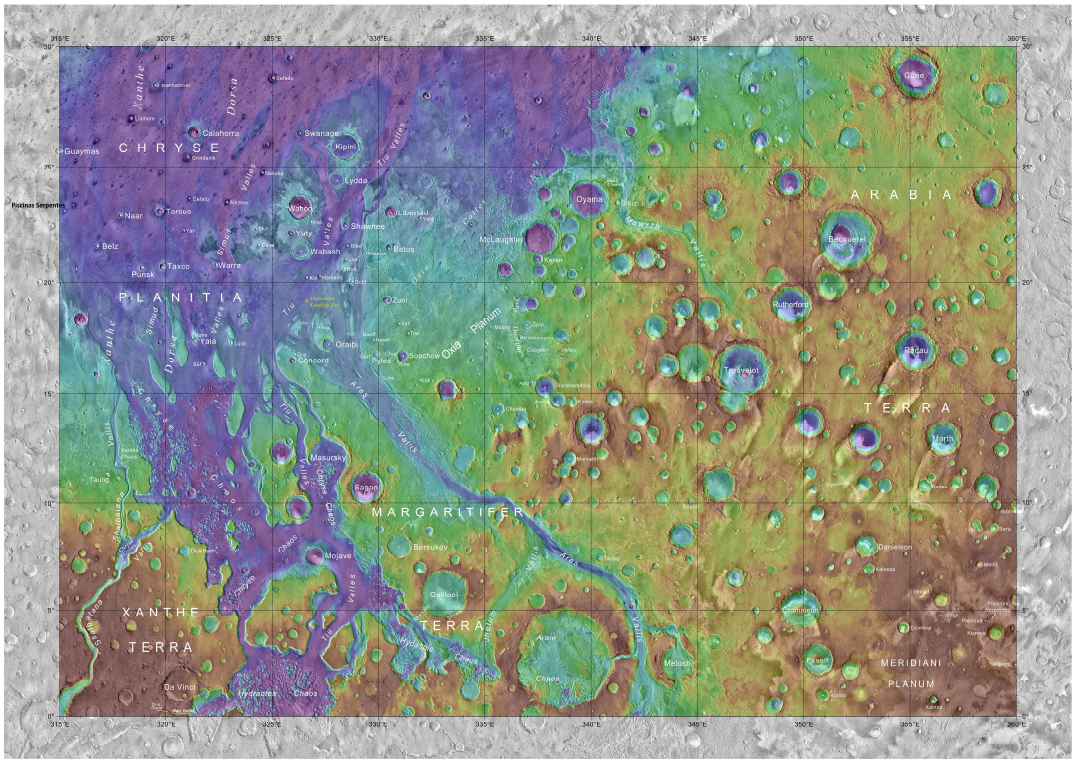
Projection: Mercator
Datum: Mars 2000 Sphere
Central Meridian: 0.0000
Standard Parallel 1: 0.0000
Latitude System: Planetocentric
Longitude System: Positive East

MOLA Elevation (m)
High : 2504
Low : -5229

0 100 200 300 400 Km
Scale 1:5,000,000 at standard parallel

Base image: THEMIS IR Day mosaic by USGS, ASU
Margin image: THEMIS IR Global Mosaic v11.0, ASU
Colorized Topography: MOLA Elevation Model, GSFC
Date of Last Nomenclature Update: August 18, 2025

Margaritifer Sinus, MC-19



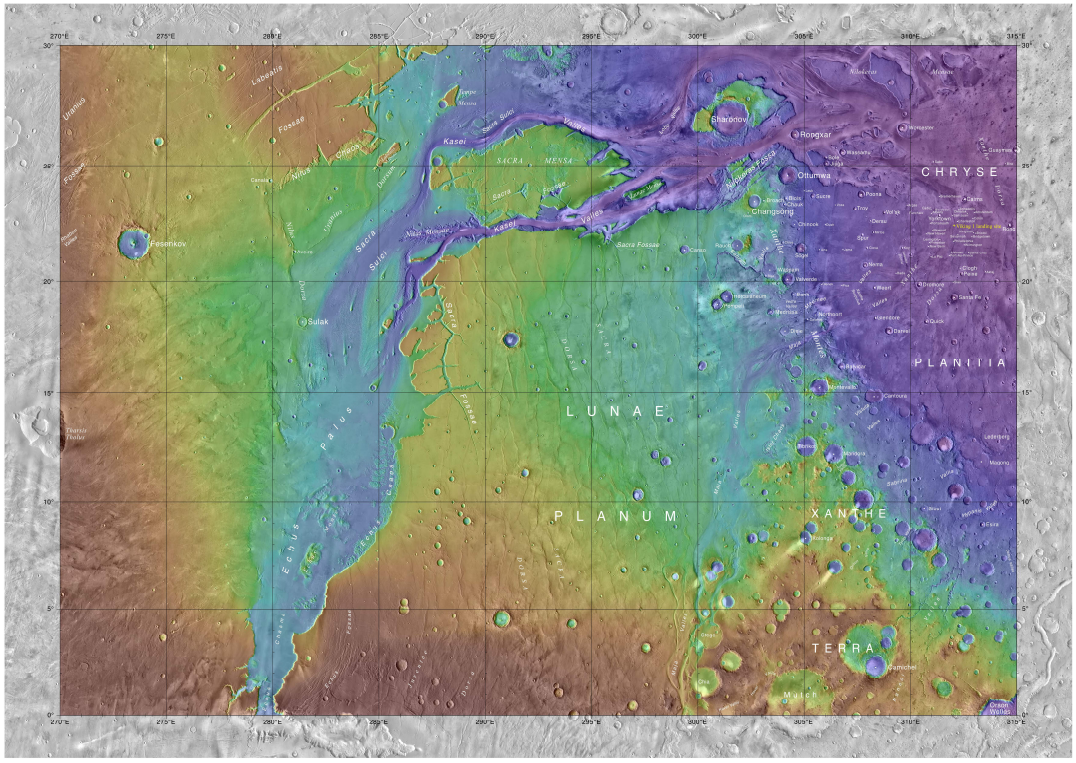
Projection: Mercator
Datum: Mars 2000 Sphere
Central Meridian: 0.0000
Standard Parallel 1: 0.0000
Latitude System: Planetocentric
Longitude System: Positive East

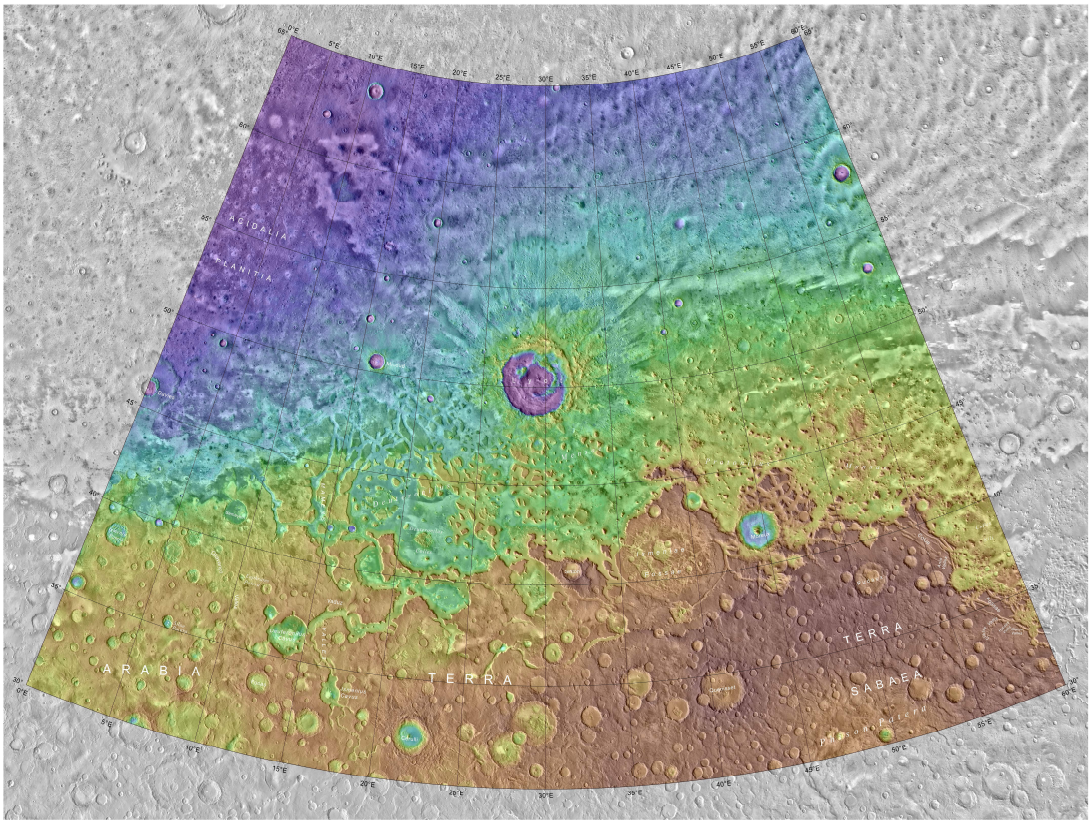
MOLA Elevation (m)
High : 651
Low : -5452

0 100 200 300 400 Km
Scale 1:5,000,000 at standard parallel

Oxia Palus, MC-11

Base image: THEMIS IR day mosaic by USGS, ASU
Margin image: THEMIS IR global mosaic v11.6, ASU
Colorized Topography: MOLA elevation model, GSFC
Date of Last Nomenclature Update: October 23, 2024


CHRYSE
PLANITIA
LUNAE
PLANUM
XANTHE
TERRA
Sharonov
Ropqxar
Otumiwa
Changsong
Fesenkov
Sulak
Kasei
Sacra
Solis
Lunae
Palus
Echus
Chasma
Labeatis
Fossae
Uranius
Mensa
Valles
Marineris
Fossa
Thoth
Thebes
Jamichel
Maler
Oxia
Mawrth
Vallis
Ares
Vallis
Tiu
Vallis
Simud
Vallis
Ravi
Vallis
Maja
Vallis
Dao
Vallis
Niger
Vallis
Huo
Hexi
Vallis
Shalbatana
Vallis
Capri
Chasma
Eos
Chasma
Juventae
Chasma
Melas
Chasma
Candor
Chasma
Ophir
Chasma
Coprates
Chasma
Tithonium
Chasma
Hebes
Chasma
Gangis
Chasma
Ganges
Chasma
Simud
Vallis
Tiu
Vallis
Ares
Vallis
Sacra
Fossae
Sacra
Mensa
Kasei
Valles
Kasei
Vallis
Sacra
Fossae
Sacra
Fossae
Sacra
Fossae



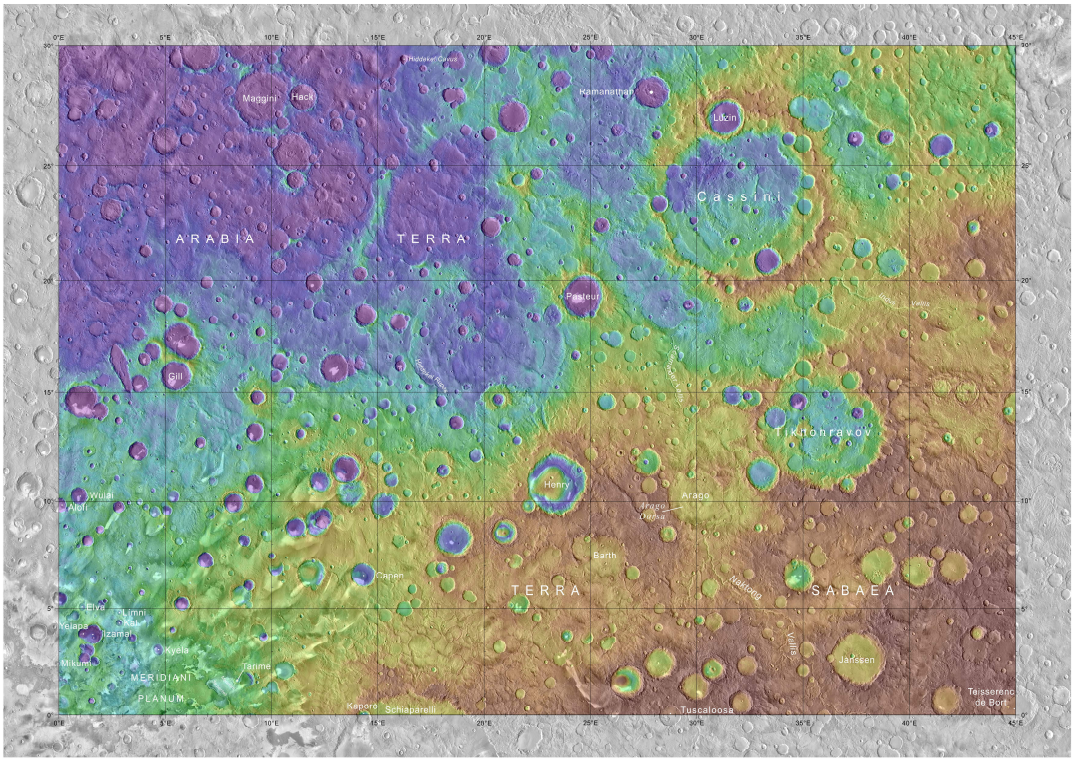
Projection: Lambert Conformal Conic
Datum: Mars 2000 Sphere
Central Meridian: 30.0
Standard Parallel 1: 36.2
Standard Parallel 2: 59.5
Scale Factor: 1.0
Latitude of Origin: 0.0
Latitude System: Planetocentric
Longitude System: Positive East

MOLA Elevation (m)
High : 1205
Low : -7013

0 100 200 300 400 Km
Scale 1:5,000,000 at standard parallel

Ismenius Lacus, MC-5

Base image: THEMIS IR Day mosaic by ASU
Margin image: THEMIS IR Global Mosaic v11.6, ASU
Colorized Topography: MOLA Elevation Model, GSFC
Date of Last Nomenclature Update: November 21, 2023



Projection: Mercator
Datum: Mars 2000 Sphere
Central Meridian: 0.0000
Standard Parallel 1: 0.0000
Latitude System: Planetocentric
Longitude System: Postive East

MOLA Elevation (m)

High : 2623

Low : -4726

0 100 200 300 400 Km

Scale 1:5,000,000 at standard parallel

Arabia, MC-12

Base image: THEMIS IR Day mosaic by ASU
Margin image: THEMIS IR Global Mosaic v11.6, ASU
Colorized Topography: MOLA Elevation Model, GSFC
Date of Last Nomenclature Update: May 6, 2025

SUBMISSÃO DO ARTIGO NO *EDITORIAL MANAGER*

Planetary and Space Science

Impact-induced lithospheric flexure and basin-breaches on Mars: a megaflood model

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	PSS-D-26-00014
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Mars, Megafloods, Basin-breach, Lithospheric flexure
Corresponding Author:	Robert Sauer Federal University of Santa Catarina BRAZIL
First Author:	Robert Sauer, MSc
Order of Authors:	Robert Sauer, MSc
	Michael Holz, PhD
Abstract:	Megafloods occurred on the early Mars after the heavy bombardment period (~4.1 Ga). Large impact craters and depressions with chaotic terrain seem to have placed closed circular-shaped lakes, especially in Xante, Margaritifer and Arabia Terra regions. Amongst several terrestrial-like mechanisms related to catastrophic flooding, basin-breach caused by rim erosion seems to be the most compelling process to have taken place in these ancient Martian lakes and a conceptual model which seeks to explain the overwhelming geological evidence for megafloods on Mars was developed, based upon high-resolution satellite images from NASA's database in Google Earth Pro. Paleolakes and associated megaflow channel were delineated by photointerpretation. Fifteen impact crater lakes and five chaotic depression lakes were recognized in the study areas. The mechanism of basin-breach by rim erosion was recognized as the trigger for the megafloods originated from these lakes. The mechanism of impact-induced lithospheric flexure was proposed as the trigger of the groundwater outbursts inside the impact craters and chaotic terrain depressions. The megaflood model depicted consists of four stages: (i) pre-impact; (ii) impact, crater formation and lithospheric flexure; (iii) formation of crater lake; and (iv) megaflood. The intense meteorite impacts that modified Mars' Noachian highlands may help us to understand more about the history of water in the Red Planet's geological past. Thus, the importance of an alternative megaflood model under a neocatastrophic approach.
Opposed Reviewers:	

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ata da sessão de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado de **Robert Sauer**, do Programa de Pós-Graduação em Geologia, realizada em 05 de fevereiro de 2026, às 09h, via **Web Conferência**.

Ao(s) cinco dias(s) do mês de fevereiro de dois mil e vinte e seis, às nove horas, via **Web Conferência**, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa da Dissertação de Mestrado do mestrando **Robert Sauer**, como requisito final para obtenção do título de **MESTRE EM GEOLOGIA**, de acordo com a **PORTARIA 01/2025/PPGGEOL**. A banca foi composta pelos seguintes professores: Prof. Dr. Michael Holz /PPGGEOL – UFSC (Presidente), Profa. Dra. Liliana Sayuri Osako/UFSC (Examinadora Interna) e Prof. Dr. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida/UFRJ (Examinador Externo), sob a presidência do primeiro. A dissertação tem como título "**Megainundações em Marte e na Terra: investigação de mecanismos geradores para um modelo neocatastrófico interplanetário**".

Com base no que foi exposto, a banca examinadora propõe que a dissertação seja:

[X] **APROVADA**, devendo a versão definitiva da dissertação ser entregue em 15 dias (máximo 90 dias).

[ ] **REPROVADA** (expor justificativa fundamentada na ata ou em documento anexo do(s) motivo(s) da reprovação).

Às 11 horas e 53 minutos foi lavrada a presente ata e encerrada a sessão, que vai assinada pelo candidato e pela banca examinadora.

Florianópolis, 05 de fevereiro de 2026.

Alteração no título da Dissertação: ( ) Sim* (X) Não
*fazer o registro final da Ata com o título definitivo

Recomendações da Banca: não há.

Banca Examinadora (assinaturas digitais):

gov.br
Documento assinado digitalmente
MICHAEL HOLZ
Data: 05/02/2026 12:16:01-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Michael Holz/PPGGEOL – UFSC
(Presidente)

ICP-Edu
Documento assinado digitalmente
Liliana Sayuri Osako
Data: 05/02/2026 22:38:44-0300
CPF: ***.285.348-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Profa. Dra. Liliana Sayuri Osako/UFSC
(Examinadora Interna)

gov.br
Documento assinado digitalmente
LEONARDO FONSECA BORGHI DE ALMEIDA
Data: 09/02/2026 14:29:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida/UFRJ
(Examinador Externo)

GOV.BR
Documento assinado digitalmente
ROBERT SAUER
Data: 09/02/2026 14:54:43-0300
CPF: ***.688.460-**
Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br

Robert Sauer
(Mestrando)