

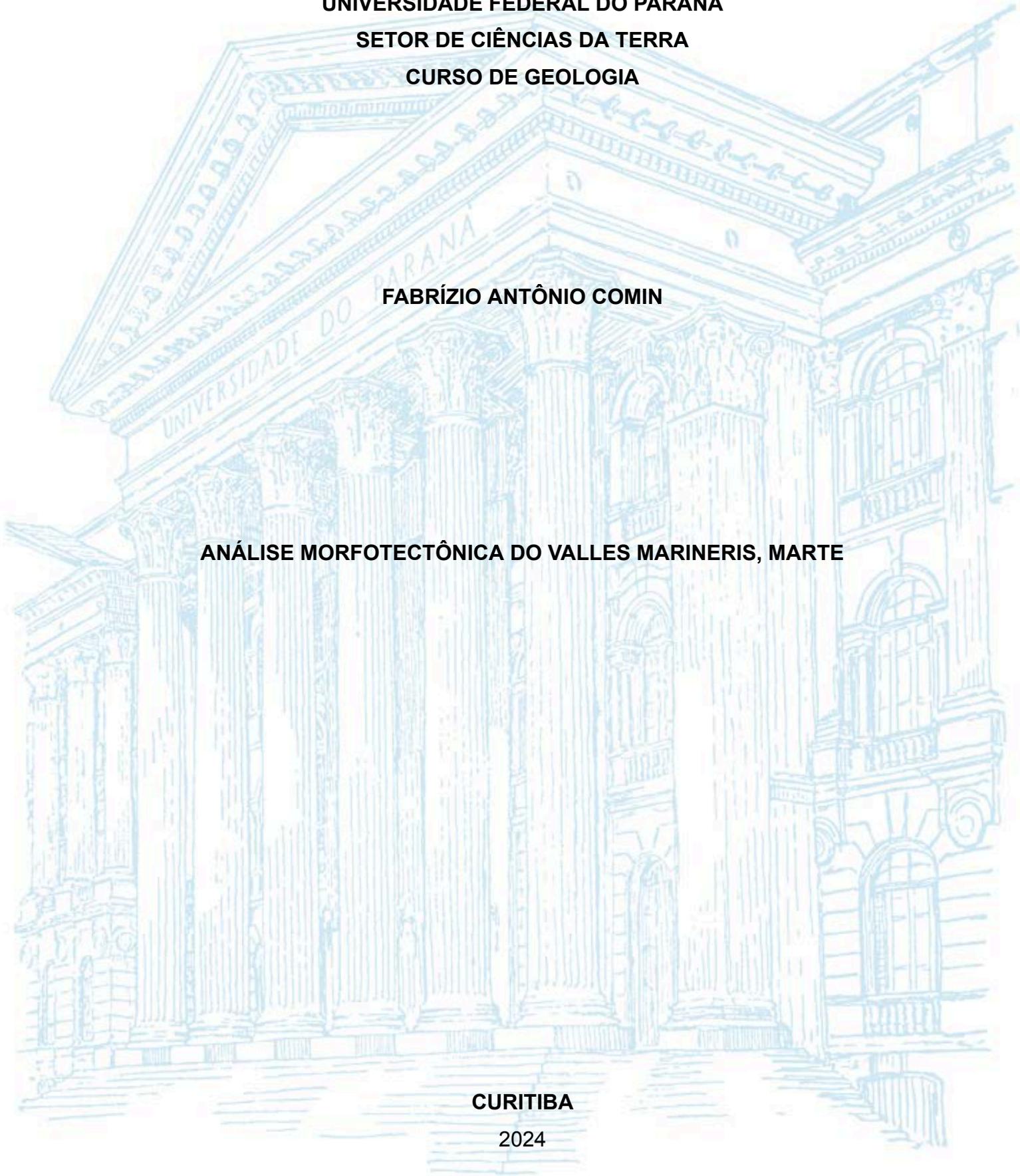
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

FABRÍZIO ANTÔNIO COMIN

ANÁLISE MORFOTECTÔNICA DO VALLES MARINERIS, MARTE

CURITIBA

2024



FABRÍZIO ANTÔNIO COMIN

ANÁLISE MORFOTECTÔNICA DO VALLES MARINERIS, MARTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr Eduardo Salamuni

Co-orientador: Dr. William Rudolf Lopes Peyerl

CURITIBA

2024

“Se descobrimos de fato uma teoria completa, ela deverá, ao longo do tempo, ser compreendida, grosso modo, por todos e não apenas por alguns poucos cientistas”

Stephen W. Hawking

AGRADECIMENTOS

Primeiro agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Salamuni, por ter aceitado trabalhar esse tema comigo e ficado tão empolgado quanto eu.

Agradeço imensamente ao meu coorientador Dr. William Rudolf Lopes Peyerl, por ter tido a maior dedicação e paciência em me ensinar durante todo o processo do TCC, e pelo seu carinho para comigo.

Agradecer ao Prof. Dr. Ricardo Michael Pinheiro Silveira, por ceder um pouco do seu tempo em me mostrar e ensinar a gerar os aspectos geomorfométricos, pois foi uma ferramenta de grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Agradecer a minha amada noiva, que esteve comigo em todos os momentos durante a graduação e que sempre me incentivou a trabalhar com aquilo que mais amo.

Agradeço aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado, incentivando meus estudos e me auxiliando em todos os momentos. Pois sem eles, minhas conquistas não teriam sido possíveis.

E por último, agradeço a Deus pelo dom da vida e da sabedoria. E quanto mais estudo sobre a geologia de outros corpos celestes, mais claro fica a evidência da sua existência, dado a complexidade e precisão de cada corpo no nosso Sistema Solar e Universo.

RESUMO

O Valles Marineris (VM) é uma das mais marcantes morfoestruturas na superfície de Marte, que se estende por 400 km, chega a 11 Km de profundidade e ultrapassa os 55 km de largura em seu trecho mais largo. Não existe em nenhum lugar conhecido, na Terra ou em qualquer outro corpo celeste conhecido, um sistema de vales desse porte. A origem dessa gigantesca morfoestrutura foi inicialmente atribuída a um sistema de rifts, gerados em um ambiente tectônico distensivo, hipótese que ainda permanece como a mais aceita entre os pesquisadores. Entretanto, existem trabalhos que divergem dessa gênese, atribuindo o desenvolvimento do VM a outros processos. Dentre esses se destaca a possibilidade do VM ser configurado por uma zona de falha transcorrente, possuindo similaridades com zonas de falhas famosas na Terra, como a Falha de San Andreas, Falha da Anatólia do Norte e a Falha do Mar Morto. Existem diversas complexidades para se obter uma resposta definitiva para esse debate, a maior delas quanto a impossibilidade de obtenção de informações diretas, sendo todas as informações existentes provenientes de sensores remotos. Entretanto, é possível correlacionar as feições geomorfológicas da região com análogas na Terra, para as quais existem vasta bibliografia que discute seus ambientes geotectônicos e modelos de deformação. Nesse sentido, foram catalogadas diversas feições do relevo e subsistemas do VM e buscamos correlatos terrestre para esses. São comuns na periferia do vale feições de relevo compressivas, como ridges e dobras de propagação de falha. Inúmeros lineamentos de relevo negativos, com direção subparalela ao eixo do VM, encaixam paleodrenagens, enquanto outros em padrão escalonado terminam e atravessam o vale principal. Além da ocorrência de falhas *bookshelf* na região interna do vale. Na porção ocidental do VM existem feixes de lineações em spray, sugerindo a terminação de transcorrências subsidiárias a falha principal. Outra feição que merece destaque são as elevações alongadas no interior do VM, possivelmente vestígios. Assim, nossas análises permitem corroborar a hipótese, cada vez mais aceita, de que o VM seja fruto de processos oriundos de um ambiente geotectônico transcorrente. Mais estudos sobre a geomorfologia do VM e dos grandes crátons que o circundam precisam ser realizados, mas os dados obtidos permitem vislumbrar a grande contribuição que essa abordagem pode oferecer aos estudos da complexa evolução do VM e do planeta Marte como um todo.

Palavras-chave: Geologia Planetária, geomorfologia tectônica, valles marineris, falhas transcorrentes, relevo de marte

ABSTRACT

Valles Marineris (VM) is one of the most striking morphostructures on the surface of Mars, stretching for 400 km, reaching 11 km in depth, and exceeding 55 km in width at its widest point. There is no known system of valleys of this size on Earth or any other known celestial body. The origin of this gigantic morphostructure was initially attributed to a rift system generated in an extensional tectonic environment, a hypothesis that remains the most accepted among researchers. However, there are works that diverge from this genesis, attributing the development of VM to other processes. Among these is the possibility that VM is configured by a strike-slip fault zone, possessing similarities with famous fault zones on Earth, such as the San Andreas Fault, the North Anatolian Fault, and the Dead Sea Fault. There are various complexities in obtaining a definitive answer to this debate, the greatest of which is the impossibility of obtaining direct information, with all existing information coming from remote sensors. However, it is possible to correlate the geomorphological features of the region with analogous features on Earth, for which there is a vast bibliography discussing their geotectonic environments and deformation models. In this sense, various relief features and subsystems of VM were cataloged, and terrestrial correlates were sought for these. Compressional relief features, such as ridges and fault propagation folds, are common on the periphery of the valley. Numerous negative relief lineaments, with a subparallel direction to the VM axis, fit paleodrainages, while others in a stepped pattern end and cross the main valley. Additionally, bookshelf faults occur within the valley region. In the western portion of VM, there are sets of spray lineations, suggesting the termination of subsidiary strikes to the main fault. Another feature that deserves attention is the elongated elevations within VM, possibly vestiges. Thus, our analyses support the increasingly accepted hypothesis that VM results from processes originating in a strike-slip geotectonic environment. More studies on the geomorphology of VM and the large cratons surrounding it need to be conducted, but the obtained data allow us to glimpse the significant contribution this approach can offer to the studies of the complex evolution of VM and the planet Mars as a whole.

Keywords: Planetary Geology, tectonic geomorphology, Valles Marineris, strike-slip faults, Mars relief

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do Valles Marineris. Imagem Themis (Thermal Emission System). 2	
Figura 2: Mapa geomorfológico simplificado dos Vales Marineris. Fonte: Modificado de Peulvast et al. (2001).....	4
Figura 3: Esboço do mapa das falhas do rifte africano e das paredes do cânion marciano na mesma escala. O Valles Marineris foi rotacionado 90 ° para dar a ambos os sistemas a mesma tendência geral. Fonte: Frey (1973).....	5
Figura 4: Diagramas de blocos esquemáticos mostrando o desenvolvimento sequencial inferido do oeste de Ophir planum e Coprates chasma. Diagramas organizados em ordem cronológica inversa. Fonte: Schultz (1991).....	6
Figura 5: Modelo estrutural tridimensional para a zona de falha de Ius-Melas-Coprates chasma. Fonte: Yin (2012).....	8
Figura 6: Cinemática de Noctis Labyrinthus e Valles Marineris. Fonte: Bistacchi (2004).	9
Figura 7: Modelo de Riedel. Fonte: Junjie et.al (2021).....	11
Figura 8: Orientação das características estruturais formadas em resposta ao cisalhamento de rejeito direcional. Fonte: modificado de Sylvester (1988); Brubank e Anderson (2001).....	12
Figura 9: Idealização geométrica da “Tectônica de estante” (Bookshelf tectonics) ilustrando os blocos girando em resposta a um cisalhamento dextral. Fonte: Cowan et. al. (1986).....	13
Figura 10: Análise geomorfométrica de perfil de curvatura evidenciando quebras positivas (vermelho) e negativas (azul).....	16
Figura 11: Análise geomorfométrica da área de contribuição, evidenciando as principais drenagens do VM e seus padrões.....	17
Figura 12: Disposição espacial dos principais tipos de de padrão de drenagens. Fonte: Christofolletti (1980).....	17
Figura 13: Interpretação dos principais lineamentos do VM, com o auxílio do atributo geomorfométrico de perfil de curvatura.....	19
Figura 14: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE deslocados por outros lineamentos de direção NW na região plana da parte sul de IC mais a oeste....	21
Figura 15: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE e NW, na região plana da parte sul de IC.....	22
Figura 16: Paleodregens encaixadas em lineamentos de direção NW em sequência, na região plana da parte sul de IC.....	23
Figura 17: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE dispostos em sequência, cortados por um lineamento de direção NW na região plana da parte sul de IC mais a leste.....	24
Figura 18: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE e NW, localizado na região plana da parte norte de IC.....	25
Figura 19: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW, na região plana ao norte de IC, próximo a MC.....	26
Figura 20: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW em CO, na	

porção mais a oeste e ao sul, com geração de escarpas dentro do vale.....	27
Figura 21: Crista na porção oeste de IC com sequência de lineamentos originando padrão escalonado.....	28
Figura 22: Crista cortada por lineamentos de direção NW.....	29
Figura 23: Crista em IC na porção leste, com aspecto brechado e lineamento de direção NW passando por ela, visível no topo, e escarpa retilínea em sua base sul.....	30
Figura 24: Crista em IC na porção mais a leste sendo cortada por lineamento de direção NW e escarpa na base sul da crista.....	31
Figura 25: Crista no final de IC, com lineamentos de direção NE e escarpa retilínea na base sul da crista.....	32
Figura 26: Crista deformada, que divide MC e CA.....	33
Figura 27: Crista na porção oeste de CO, deformadas de forma arqueada e cortada por lineamentos NE. Presentes desmoronamentos de terra e lineamentos NNE.....	34
Figura 28: Crista em CO com lineamentos de direção NW, deformando a crista e indicando cinemática.....	35
Figura 29: Evidência de deslocamento lateral em OP.....	36
Figura 30: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW e WNW, com deslocamento lateral para esquerda.....	37
Figura 31: Crista em OP de direção NE com deslocamento lateral para esquerda, ocasionado por lineamentos de direção NW.....	38
Figura 32: Região da escarpa de CO, com leque aluvial e dobra de arrasto delimitada por um lineamento WNW.....	39
Figura 33: Lineamento de direção NE no extremo oeste de IC, soterrado por deslizamento de terra, deixando-o mais evidente. Observe sua continuidade nas paredes do vale.....	40
Figura 34: Lineamentos de direção NE em padrão escalonado.....	41
Figura 35: Lineamentos de direção NW escalonados na porção central de IC dentro do vale. Notar que também há lineamentos de direção E-W.....	42
Figura 36: Escarpa retilínea na porção oeste de CO.....	43
Figura 37: Escarpas retilíneas no final do VM em CO.....	44
Figura 38: Padrões de drenagens principais no VM.....	46
Figura 39: Falhas de grande extensão com padrão escalonado atravessando o vale de IC e seccionando a crista.....	47
Figura 40: Crista com escarpa e facetas triangulares.....	48
Figura 41: Interior do vale de IC com falhas bookshelf.....	50
Figura 42: Região em OP com falhas normais e falhas transcorrentes no mesmo padrão de uma elipse de tensão para formação de estruturas de grande escala.....	51
Figura 43: Comparação do padrão de drenagem do VM com a falha do Mar Morto. Fonte: Google Earth.....	53
Figura 44: Comparação das falhas cortando a crista em IC no VM com os lineamentos que cortam a crista na falha da Anatólia do Norte. Fonte: Google earth.....	54
Figura 45: Comparação do talude no VM com o talude do Mar de Mármara na falha da Anatólia do Norte. Fonte: Google Earth.....	55
Figura 46: Comparação dos deslocamentos laterais do VM em OP e na falha de San Andreas. Fonte: Google Earth.....	56

Figura 47: Comparação da dobra de arrasto encontrada em CO no VM com a de Enriquillo-Plantain Garden no Haiti. Fonte:Google Earth..... 57

LISTA DE SIGLAS

CA	Candor chasma
CO	Coprates chasma
CTX	Context Camera
HiRISE	High-Resolution Imaging Science Experiment
IC	Ius chasma
MC	Melas chasma
OP	Ophir planum
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SP	Sinai planum
TC	Tithonium chasma
THEMIS	Thermal Emission System
VM	Valles Marineris

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Geomorfologia regional.....	2
3. Contexto histórico.....	4
4. Fundamentação teórica.....	9
5. Materiais e Métodos.....	13
6. Resultados.....	14
6.1 Geomorfometria.....	14
6.2 Morfoestruturas.....	15
6.2.1 Lineamentos em paleodrenagem.....	16
6.2.2 Crista.....	23
6.2.3 Deslocamento lateral.....	31
6.2.4 Lineamentos.....	35
6.2.5 Escarpas.....	38
7. DISCUSSÃO.....	41
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	52
REFERÊNCIAS.....	53

1. Introdução

Qual o legado que deixaremos para os futuros habitantes do nosso sistema solar? Refletir sobre a geologia de outros planetas é necessário pois a terra é finita, o avanço tecnológico e a ambição humana gera o desejo de ir além. Estudar a geologia de outros corpos celestes, sejam eles, planetas rochosos, gasosos ou satélites naturais, é de extrema importância para melhor compreensão do nosso Sistema Solar e demais sistemas, contribuindo para a compreender o universo que estamos inseridos. E pensar que outros corpos celestes podem ter análogos com a Terra, podendo inferir um regime tectônico, leva a pensar que esses corpos também são únicos e tem as suas particularidades, sendo empolgante estudar algo que está longe do nosso alcance, mas que um dia será possível alcançar com facilidade e confirmar as teorias que hoje só são possíveis por imagens de satélite. Marte possui várias pesquisas desde o século XX, por possuir uma ampla rede de informações foi escolhido como objeto de pesquisa, além de estar sendo considerado para possível colonização humana no futuro, portanto o seu entendimento geológico se faz necessário.

O Valles Marineris (VM), localizado ao sul do equador de Marte, é o maior sistema de cânions conhecido do sistema solar e tem. Trata-se de um sistema de vales de 4000 Km de comprimento e 55 Km de largura em seu trecho mais largo e uma diferença de relevo de até 11 Km nas partes centrais (Figura 1). A notável escala deste relevo se deve, em parte, à falta de atividades fluviais e pluviais recentes que impediu o rápido preenchimento das depressões (Peulvast et al., 2001).

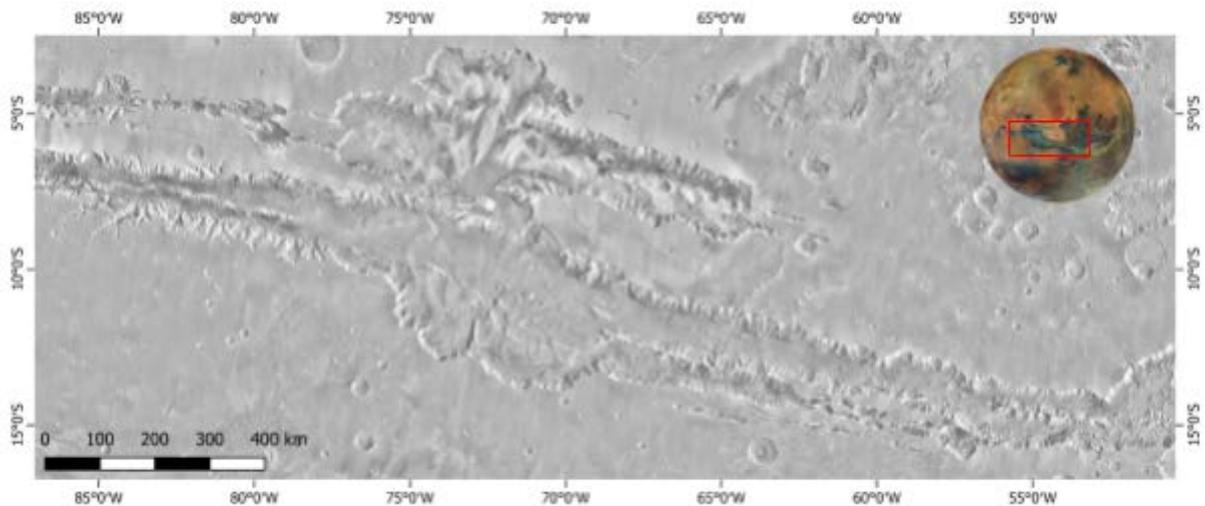


Figura 1: Localização do Valles Marineris. Imagem Themis (Thermal Emission System)

Estudos pioneiros, como os de Frey (1979), sugeriram que a formação do Valles Marineris possuía fortes paralelos com a tectônica de riftes da Terra, enfatizando semelhanças estruturais com os cânions africanos. Análise essa que foi aprofundada por Schultz (1991) e Peulvast (2001), explorando a relação entre a erosão e o tectonismo, bem como a evolução geomorfológica das encostas do Cânion. A morfologia das paredes do VM foi investigada por Peulvast (2001), sugerindo que a erosão desempenhou um importante papel no modelamento atual do Valles Marineris, complementando a influência primária de falhas tectônicas concluído por Schultz (1991).

De acordo com Yin (2012), às características tectônicas de Valles Marineris incluem evidências de falhas transcorrentes de grande escala, sugerindo que o VM pode ter experimentado não apenas subsidência associada ao rifteamento, mas também grandes falhas com deslizamento horizontais significativos, evidenciando estruturas geomorfológicas e lineamentos característicos de um regime transcorrente. Essa observação diverge da maioria dos estudos, principalmente aqueles publicados por Frey (1979), Schultz (1991) e Peulvast (1993 e 2001), que consideram o Valles Marineris como um sistema de Rifts ou formado por processos erosivos.

Algumas falhas famosas no mundo são transcorrentes, como a falha de San Andreas, Altyn Tagh e da Anatólia do Norte. Considerando que as estruturas estejam associadas a um segmento relativamente reto de uma zona transcorrente, muitas

falhas acabam criando tensões de compressão, como cavalgamentos e dobras, ou de tração, como falhas normais e bacias, nas curvas da falha (Burbank, 2001).

1.1 Justificativa e objetivos

A hipótese desse trabalho é procurar, por meio de imagens de satélite, que o Valles Marineris tenha se formado por meio de dinâmicas internas do planeta, como tectonismo e possivelmente uma transcorrência. Ao invés de estritamente formado por dinâmicas externas, de erosão ou fraturamento relacionado ao resfriamento da crosta marciana.

Com o arcabouço teórico a respeito das feições geomorfológicas em literatura existente para a Terra, como Burbank (2001) e, tendo em vista a complexidade estrutural do VM e a divergência a respeito de sua gênese, o presente trabalho tem por objetivo relacionar a um modelo tectônico do VM ou de grande parte dele, detalhando suas feições estruturais, corroborando para um ambiente de transcorrência.

A proposta de modelo tectônico para o VM foi decidida após análises e interpretações das imagens e correlações com a Terra, com o intuito de saber em qual modelo tectônico o VM se encaixa melhor. Com isso trazendo a colaboração para pesquisas futuras sobre a área e a evolução tectônica de Marte.

2. Geomorfologia regional

As feições topográficas do planeta são referidas utilizando termos específicos, como é feito para diversos astros do Sistema Solar. *planum* são regiões planas situadas em altas altitudes, vales são referidos como *vallis* (singular) ou *valles* (plural) e os cânions são denominados de *chasma*, essas são as feições topográficas no Valles Marineris.

O Valles Marineris é um sistema de vales composto pelos vales principais e mais extenso, Ius, Melas e Coprates, onde Ius chasma (IC) que está situado na parte oeste do VM; Melas chasma (MC) no meio e Coprates chasma (CO) que se encontra na parte leste. Também há o Candor chasma (CA), um cânion um pouco

mais largo que os demais, situado na parte central acima de MC, Tithonium chasma (TC) a oeste, um cânion estreito Ophir chasma (OC), o menor cânion do sistema, que fica acima de CA; Ophir planum (OP) que é a região que divide Candor e Coprates chasma e, finalmente, o Sinai planum (SP) fica logo abaixo do Valles Marineris, sendo uma planície de altitude que limita o VM (figura 2).

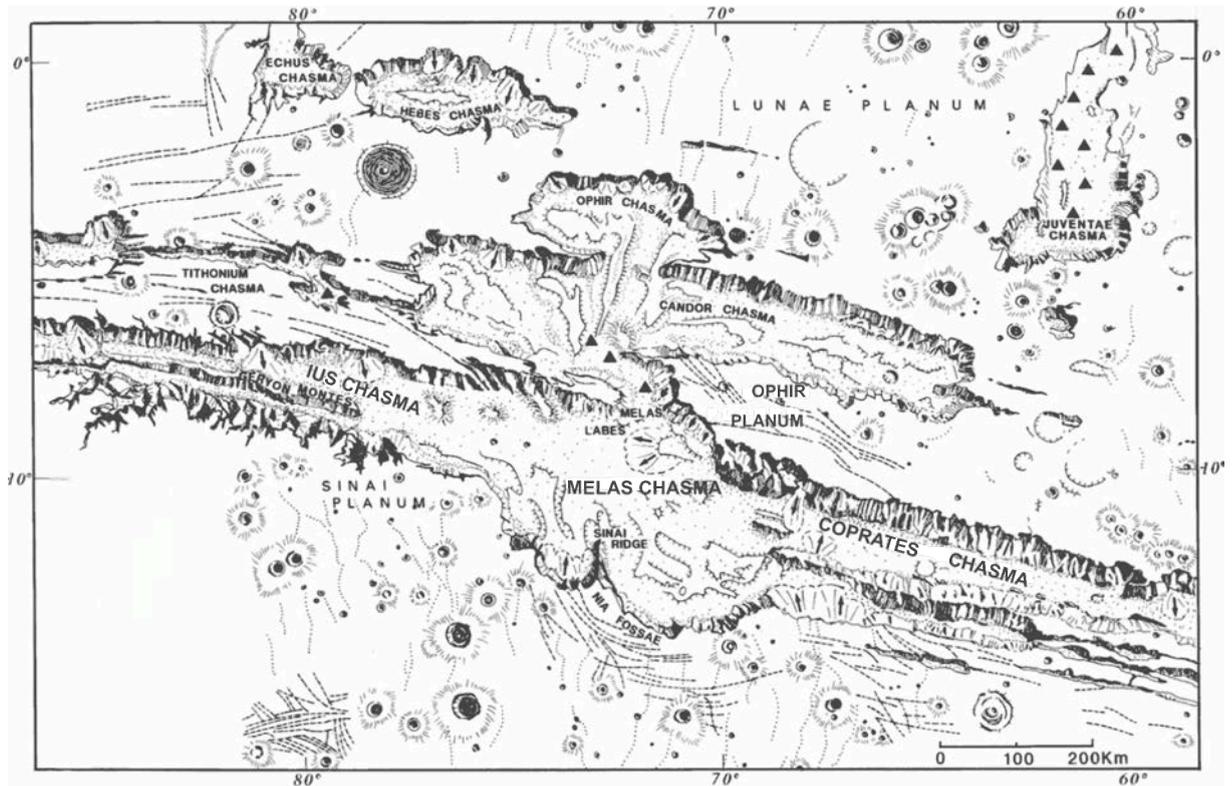


Figura 2: Mapa geomorfológico simplificado dos Vales Marineris (modificado de Peulvast Masson, 1993a). 1: Borda de calha, crista; 2: escarpa inferior; 3: impacto de cratera; 4: impacto de cratera com ejeção lobada; 5: depressão fechada; 6: terreno caótico; 7: deslizamento; 8: falha; 9: crista de crenulação. Fonte: Modificado de Peulvast et al. (2001).

3. Contexto histórico

Dada a grande escala do Valles Marineris e sua importância para o entendimento da evolução de Marte, a sua origem permanece incerta. Diversas hipóteses foram sugeridas ao longo do tempo, como: (1) rifteamento (Frey, 1979; Schultz, 1991; Peulvast, 2001), (2) remoção de materiais solúveis ou escoamento de magma pela superfície, (3) colocação de grandes diques que derreteram o gelo no subsolo, resultando na formação catastrófica de canais de escoamento, (4) interação

entre a atividade vulcânica impulsionada pela região de Tharsis e uma antiga bacia de proporções continentais, e (5) uma grande falha transcorrente, possivelmente relacionada a um processo similar à tectônica de placas (Bistacchi, 2004; Webb, 2002, Yin, 2012).

Frey (1979) compara os cânions do Valles Marineris com os Riftes do Leste Africano, utilizando a reconstrução das paredes dos cânions do VM e comparando com os riftes africanos em termos de comprimento e largura, ajustando para a escala planetária, concluindo que as escarpas dos cânions marcianos são mais largas que os riftes africanos (figura 2), sugerindo que a crosta de Marte é 50% mais espessa que a da África.

Em uma análise da região de Coprates Chasma e Ophir Planum no Valles Marineris, Schultz (1991) sugere que falhas normais definem a margem norte de Coprates Chasma e o desenvolvimento do vale foi por meio de grabens e hemi-grabens, passando por várias fases de falhamentos, indicando uma extensão da litosfera marciana (figura 3), semelhante ao rifteamento continental na Terra, atribuindo a formação do VM a processos tectônicos.

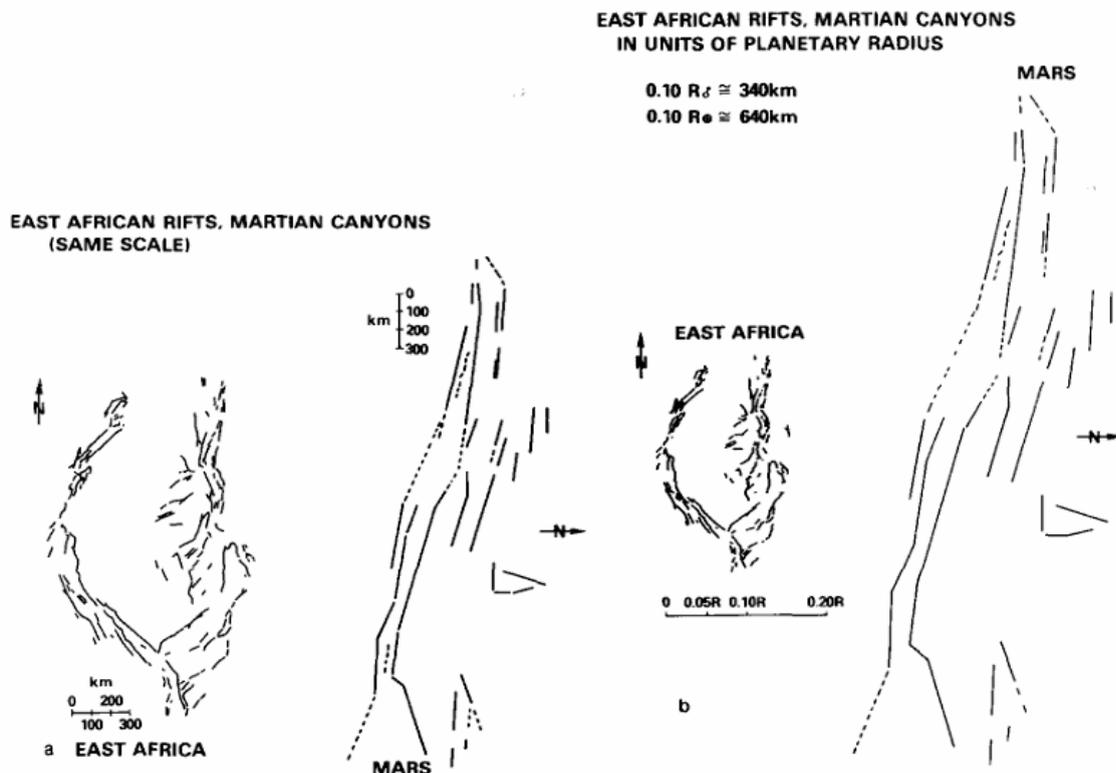


Figura 3: Esboço do mapa das falhas do rifte africano e das paredes do cânion marciano na mesma escala. O Valles Marineris foi rotacionado 90 ° para dar a ambos os sistemas a mesma tendência geral. (a) Sistemas de rifte na mesma escala em quilômetros. (b) Sistemas de rifte na mesma escala • em unidades de raio planetário. Observe o padrão complexo de falhas relativamente curtas na África e o padrão relativamente simples de longas escarpas em Marte. Fonte: Frey (1973).

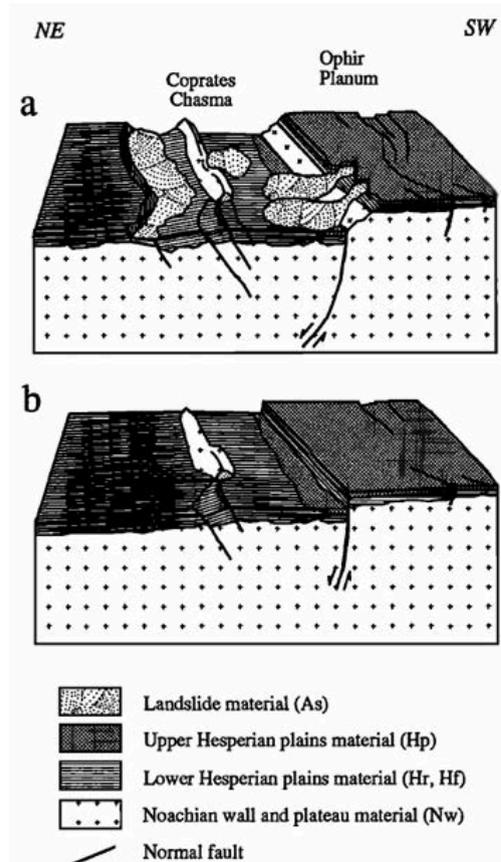


Figura 4: Diagramas de blocos esquemáticos mostrando o desenvolvimento sequencial inferido do oeste de Ophir planum e Coprates Chasma. Diagramas organizados em ordem cronológica inversa. (a) Configuração atual. (b) Mesma região durante um estágio anterior da deformação. Fonte: Schultz (1991).

Para um estudo das variações morfológicas e tectônicas das encostas do Valles Marineris, Peulvast (2001) constatou que as encostas do VM são fortemente influenciadas por processos tectônicos como falhas normais, desempenhando um papel importante para sua formação (figura 4). Sua morfologia indica uma evolução complexa, com fases distintas de atividade tectônica e erosiva. Suas observações mostraram que, ao longo do tempo, houve mudanças significativas nos processos erosivos, que moldaram as encostas, havendo uma transição das condições

morfogenéticas “antigas” (controlado por falhas e alto conteúdo de gelo, facilitando a erosão extrema e o alargamento das depressões) para “recentes” (dissecação parcial das paredes, indicando diminuição do gelo e atividade tectônica contínua, com menor erosão, resultando em escarpas de falha recentes), coexistindo formas de relevo desenvolvidas em diferentes estágios, o que reflete em uma evolução complexa dos processos erosivos e tectônicos no desenvolvimento geológico do Valles Marineris.

Algumas estruturas em Marte sugerem outro tipo de regime tectônico além de rifteamento, como as cristas enrugadas investigadas por Waters (1993), que são arcos longos e cristas assimétricas estreitas, atribuídas a dobras e/ou falhas de empurrão, normalmente encontradas em planícies suaves de origem vulcânica. Waters ainda discute sobre a origem dessas cristas, onde modelos de história térmica apontam que o resfriamento rápido e a contração global de Marte contribuíram para o tectonismo compressional. Mas *stress* horizontais, locais e regionais também são necessários para explicar essas estruturas.

Outras estruturas estão presentes no Valles Marineris, que levam diferentes interpretações a respeito da sua origem, como a possibilidade de uma zona de falha transcorrente. Para Yin (2012) o VM tem evidências de uma deformação transtensional sinistral (figura 5) com a interpretação de que as margens dos platôs e desfiladeiros da região de Ius e Coprates Chasma sofreram esse tipo de deformação. Além da presença de sedimentos moles sintectônicos deformados, que sugerem a presença de água na superfície durante a tectônica transcorrente. Yin ainda traz um análogo terrestre, comparando a falha do Valles Marineris com a falha do Mar Morto na península arábica, entre Israel e a Cisjordânia, pois em ambas é possível observar estruturas como dobras, juntas e falhas de deslizamento, além de aspectos geomorfológicos como o padrão de drenagens. A descoberta de uma zona de falha transcorrente levanta questões sobre a tectônica de placas em Marte.

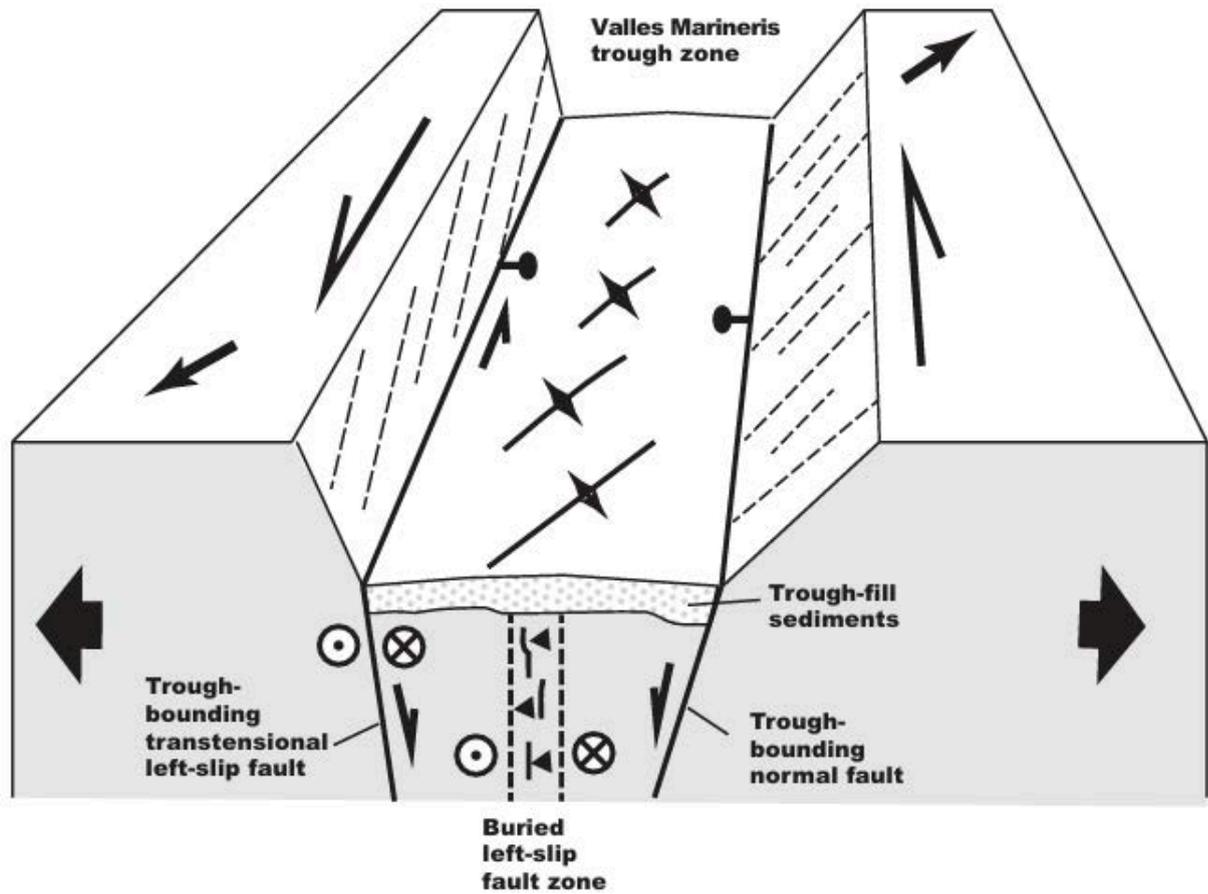


Figura 5: Modelo estrutural tridimensional para a zona de falha de lus-Melas-Coprates Chasma. Observe que a zona de falha consiste em várias falhas e uma zona de vale que pode ser delimitada de um lado por uma falha normal e do outro lado por uma falha de deslizamento devido à partição de deformação da tectônica transtensional. Uma zona de cisalhamento de deslizamento também pode estar abaixo de uma seção espessa de sedimentos de calha. Fonte: Yin (2012)

Com essas diversas hipóteses a respeito da origem do Valles Marineris, Schultz (1998) diz que a formação dos vales e bacias do VM envolveu múltiplos processos, como subsidência e falhamento, havendo uma separação temporal dos processos que formaram as bacias ancestrais e os falhamentos tectônicos que formaram os vales estruturais. Bistacchi (2004) propôs três pulsos tectônicos distintos na região de Noctis Labyrinthus e Valles Marineris (figura 6), sendo a fase D1 caracterizada por uma transtensão sinistral ao longo de falhas principais de direção NNE na parte norte de Noctis Labyrinthus. A fase D2 envolveu uma extensão que foi responsável pela formação do VM, e uma fase D3 onde foram identificadas apenas no Valles Marineris falhas de deslizamento NW cortando a D2.

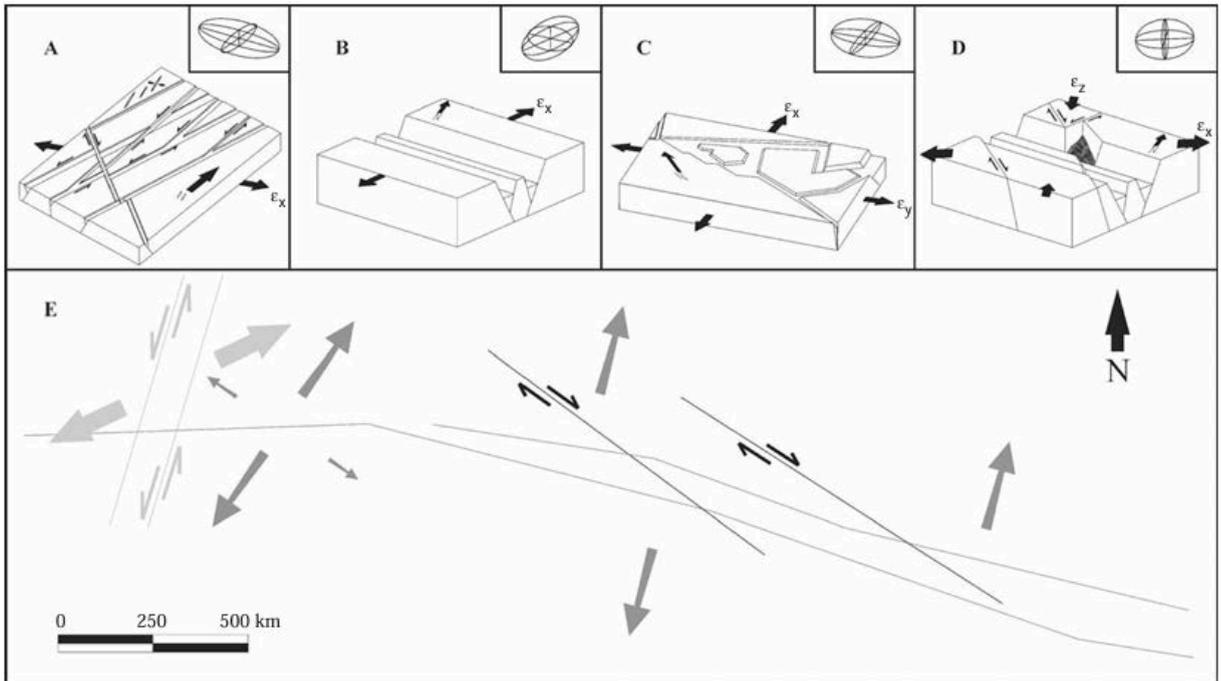


Figura 6: Cinemática de Noctis Labyrinthus e Valles Marineris. (A) Diagrama de blocos da Fase D1 em Noctis Labyrinthus. Setas grandes: eixo de deformação principal. Inserção: elipsoide de deformação consistente com transtensão. (B) Diagrama de blocos da Fase D2 no Valles Marineris. Setas grandes: eixo de deformação principal. Inserção: elipsoide de deformação consistente com campo de deformação do plano andersoniano extensional. (C) Diagrama de blocos da Fase D2 em Noctis Labyrinthus. Inserção: elipsoide de deformação triaxial verdadeiro oblato consistente com falha ortorrômbica. (d) Diagrama de blocos esquemáticos da fase D3 no Valles Marineris. Inserção: elipsoide de deformação consistente com um campo de deformação plano andersoniano em regime de deslizamento. (E) Esboço cinemático de Valles Marineris e Noctis Labyrinthus. Fase D1 - cinza brilhante; Fase D2 - cinza escuro; Fase D3 - preto. Fonte: Bistacchi (2004).

4. Fundamentação teórica

As falhas transcorrentes, termo comumente utilizado para falhas de rejeito direcional, são estruturas tectônicas de alto ângulo caracterizadas por movimentos horizontais ao longo de um plano de falha, os rejeitos podendo ser dextral (deslocamento lateral direita) ou sinistral (deslocamento lateral esquerda). As falhas transformantes são grandes falhas de rejeito direcional, de escala quilométrica ou maior, delimitando limites de placas (Fossen, 2010).

Conforme Sylvester (1988), as falhas transcorrentes apresentam padrões geométricos característicos, como estruturas escalonadas, dobramentos e bacias associadas a zonas de falha, ocorrendo em resposta a forças cisalhantes que causam deslocamentos laterais (dextral ou sinistral). A identificação de falhas transcorrentes é facilitada na paisagem pela observação de feições geomorfológicas de vales lineares, como descontinuidades que se destacam (sulcos de relevo), deslocamentos laterais de rios e drenagens, e escarpas de falha (desníveis abruptos associados ao movimento direcional).

Sylvester (1988) ainda destaca sobre o conceito de transtensão, referindo à combinação de cisalhamento lateral com uma componente normal, tendo como resultado feições como grabens e bacias alongadas, que atuam como armadilhas para sedimentos. Essas bacias são uma das maiores evidências de uma zona de falha transtensional, refletindo na interação entre as forças de estiramento crustal e deslocamento lateral.

Wilcox et. al (1973) também destaca que os padrões de deformações em zonas de falhas transtensionais podem ser observados em modelos experimentais, onde a interação das forças cisalhantes e extensionais criam estruturas escalonadas e deformações secundárias características.

O modelo de Riedel (Figura 7), experimentos em argila feito por Riedel no início do século XX, que consistia em dois blocos de madeira cobertos por uma camada de argila, ao serem movimentados um em relação ao outro, os esforços eram transferidos para a camada de argila que se deformava progressivamente. Então Riedel percebeu que a camada de argila desenvolvia uma zona de deformação composta por um arranjo de pequenas fraturas, que foram classificadas

com base na sua direção e sentido de deslocamento em relação a zona de falha de rejeito direcional (Fossen, 2010).

O modelo de Riedel foi introduzido por Wilcox et al. (1973) como uma ferramenta para entender a evolução das falhas transcorrentes. No modelo, as estruturas associadas a falhas cisalhantes são organizadas em padrões específicos, como a falha Y (principal), alinhada paralela à zona de falha principal, as falhas R (Riedel), fraturas primárias orientadas a aproximadamente 15° do plano de cisalhamento principal, e falhas P, que são estruturas secundárias formadas em ângulos opostos às falhas R, além das falhas antitéticas, um terceiro conjunto de fraturas encontradas em alto ângulo com relação a zona. Denominadas de fraturas de cisalhamento R' e são menos desenvolvidas que as fraturas R (Fossen, 2010).

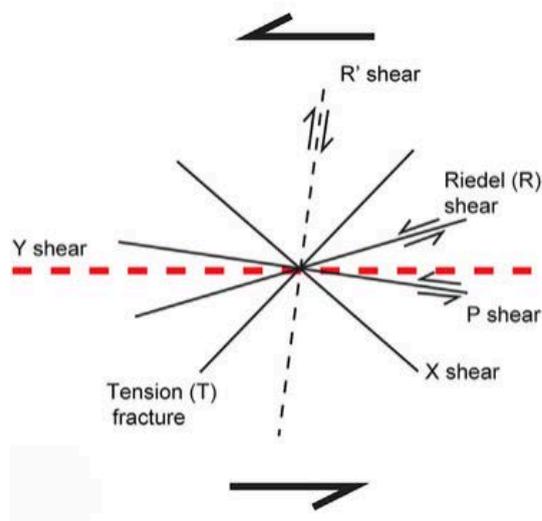


Figura 7: Modelo de Riedel. Fonte: Junjie et.al (2021).

Sylvester (1988) e Burbank e Anderson (2001) perceberam que junto dos sistemas de fraturas de Riedel, há geração de morfoestruturas como falhas normais formadas perpendicularmente à direção do alongamento máximo e da tensão máxima de tração, e falhas compressoriais formadas aproximadamente perpendicular à tensão compressiva principal (Figura 8).

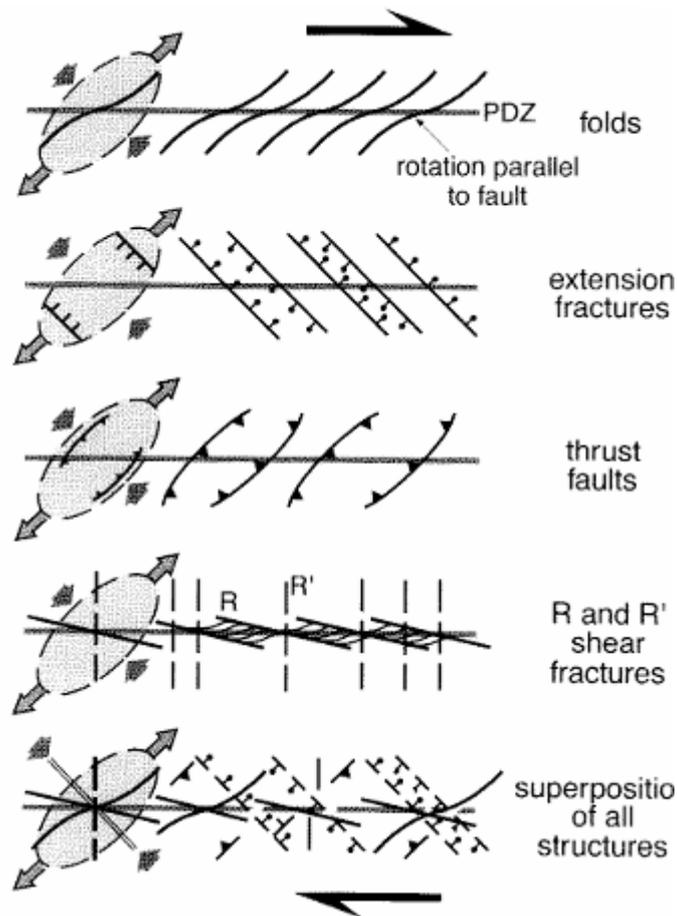


Figura 8: Orientação das características estruturais formadas em resposta ao cisalhamento de rejeito direcional. Fonte: modificado de Sylvester (1988); Brubank e Anderson (2001).

Burbank e Anderson (2001) destacam algumas feições morfológicas principais geradas por falhas transcorrentes, como dobras e falhas escalonadas, dobras de arrasto, cristas alongadas, bacias de *pull-apart* e escarpas de falha. Além de vales lineares, concentrando a erosão em uma zona de falha, deslocamentos laterais de rios e drenagens e facetas triangulares.

Outra estrutura importante é o padrão clássico *bookshelf*, que ocorre em uma zona de cisalhamento ampla. Descrito primeiramente por Freund (1974) como rotação antitética de falhas de deslizamento, porém Cowan et al. (1986) na zona de fratura de Sovanco em Vancouver (Canadá), descrevem como falhas escalonadas acomodadas dentro de uma zona de cisalhamento de maior escala, em que essas falhas são oblíquas aos limites da zona. Associa a formação dessas pequenas falhas como fraturas extensionais ou fraturas de Riedel. Estabelecem então o modelo de *bookshelf tectonics*, que traduzindo seria “tectônica de estante”, havendo três consequências (Figura 9): a primeira seria que a rotação dos blocos cria de

lacunas triangulares entre os limites dos blocos e a zona de falha; a segunda que essas pequenas falhas que delimitam os blocos estão confinadas dentro da zona de falha; e a terceira que o material rotacionado é estendido paralelo à direção de deslizamento da zona de falha.

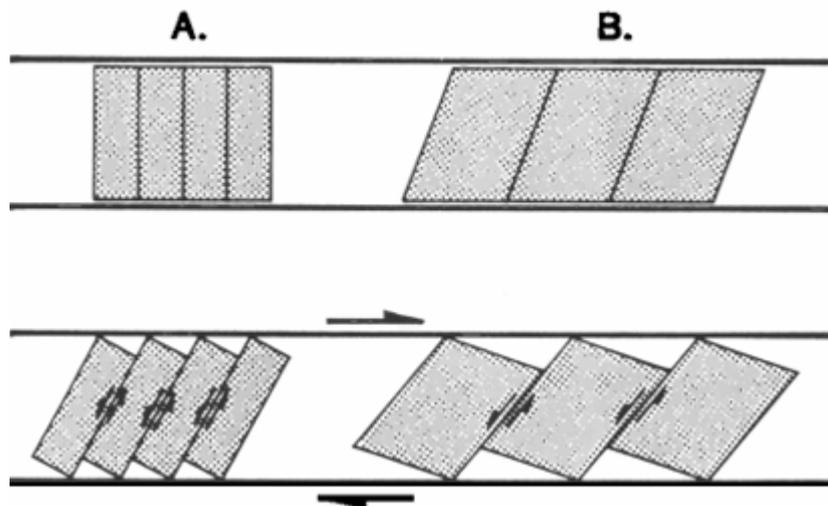


Figura 9: Idealização geométrica da “Tectônica de estante” (*Bookshelf tectonics*) ilustrando os blocos girando em resposta a um cisalhamento dextral. Em A as áreas são orientadas (irrealisticamente) normais aos limites da zona de cisalhamento. Em B as áreas estão próximas às relações angulares encontradas, onde as falhas que limitam os blocos são oblíquas aos limites da zona de cisalhamento. Fonte: Cowan et. al. (1986)

5. Materiais e Métodos

Os materiais utilizados foram dados públicos de imagens de satélite, como o Thermal Emission Imaging System (THEMIS) obtido da espaçonave Mars Odyssey, com resolução espacial de 100 m/pixel (metros por pixel) disponível na <https://astrogeology.usgs.gov> e imagens Context Camera (CTX) com resolução espacial de ~5.2 m/p que estão disponíveis na <https://hirise.lpl.arizona.edu>.

Além do Modelo Digital de Elevação (MDE) Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), com resolução espacial de 463m/p para aplicação no software SIG QGis. O MDE MOLA foi usado como base altimétrica para gerar índices morfométricos de posição topográfica, processado pelo *software* SAGA (Sistema Automatizado de Análise Geoespacial), versão 9, ferramenta *basic terrain analysis* opção *profile curvature*, para gerar o perfil de curvatura conforme variáveis direcionais de Zevenberg e Thorne (1987). Foram definidas em 3 classes, sendo as menores que representam as partes côncavas do terreno, e as maiores que representam as partes convexas do terreno, a classe intermediária representa os terrenos planos. Isso evidencia as quebras de relevo positivas (convexas) e quebras de relevo negativas (côncavas), auxiliando na interpretação de grandes estruturas e/ou falhas na área de estudo, conforme utilizado por Silveira (2019) em mapeamento geomorfológico.

Também foi gerado o atributo de área de contribuição, por sua vez, que foi quantificado por Tarboton (1997), com o algoritmo D-8 processado pelo *software* SAGA versão 9, pela ferramenta *basic terrain analysis* opção *total catchment area*, que considera a proporção de fluxo para cada célula, gerando as principais paleodrenagens do VM a partir do MDE, exibindo seus padrões.

As imagens THEMIS foram usadas para reconhecimento e localização de estruturas-chave regionais em conjunto com a análise morfométrica de perfil de curvatura gerado pelo software QGis, sendo possível visualizar e interpretar melhor estruturas de grande escala. Já as imagens CTX serviram para identificar e analisar as morfoestruturas encontradas em maior detalhe. A interpretação das estruturas foram feitas gerando imagens georreferenciadas e demarcando os principais lineamentos para visualização, descrição, interpretação e anexação na discussão do trabalho.

Foram selecionadas mais de 100 imagens CTX para análise de todo o sistema de vales do Valles Marineris, dentre as quais foram escolhidas as que continham feições geomorfológicas lineares expressivas e estruturas tectônicas notáveis. Após a descrição e interpretação, foi feita a busca de correlações das estruturas encontradas em Marte com a Terra, com o intuito de trazer maior robustez para os dados analisados.

6. Resultados

6.1 Geomorfometria

A análise morfométrica foi realizada com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) MOLA de Marte, gerando o atributo geomorfométrico de perfil de curvatura. Esse procedimento destacou as quebras negativas e positivas do relevo do Valles Marineris (Figura 10), permitindo a identificação de grandes estruturas, paleodrenagens encaixadas com deslocamentos locais e lineamentos estruturais (Figura 11).

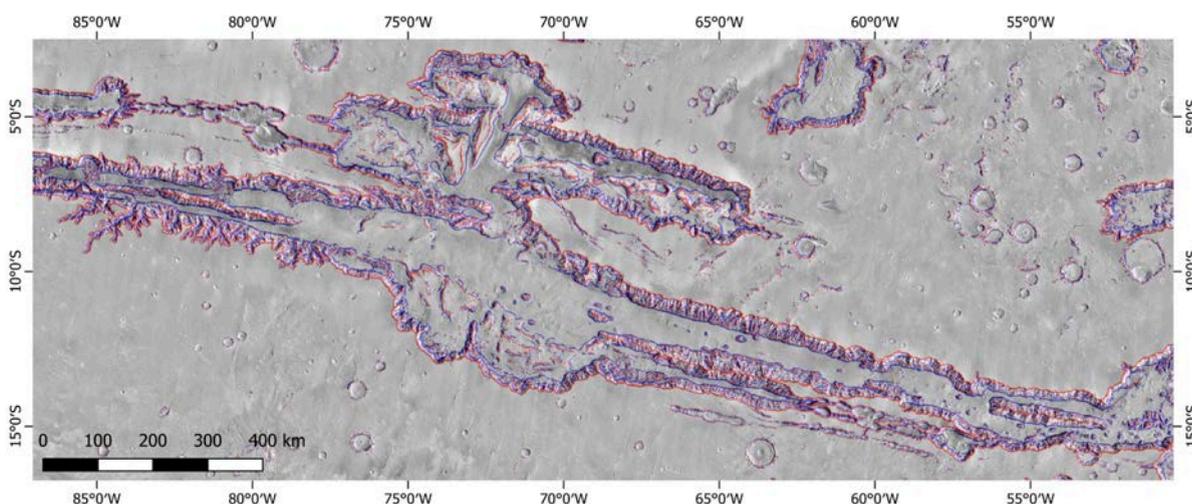


Figura 10: Análise geomorfométrica de perfil de curvatura evidenciando quebras positivas (vermelho) e negativas (azul).

Além do perfil de curvatura, foi gerado as principais drenagens do VM, utilizando o atributo de área de contribuição (Figura 11). Com isso foi possível identificar padrões de drenagens comuns, análogos aos encontrados na Terra, como o padrão de drenagens paralelas, indicando padrão em treliça nas planícies altas entre IC e TC e em OP. E um padrão mais irregular nas planícies altas a sul, a norte do VM, indicando um padrão dendrítico/subdendrítico e em CA e IC ocorre um padrão de drenagens oriundos de apenas um dos lados das paredes, indicando um padrão paralelo. Conforme a disposição espacial dos principais padrões representados na figura 12.

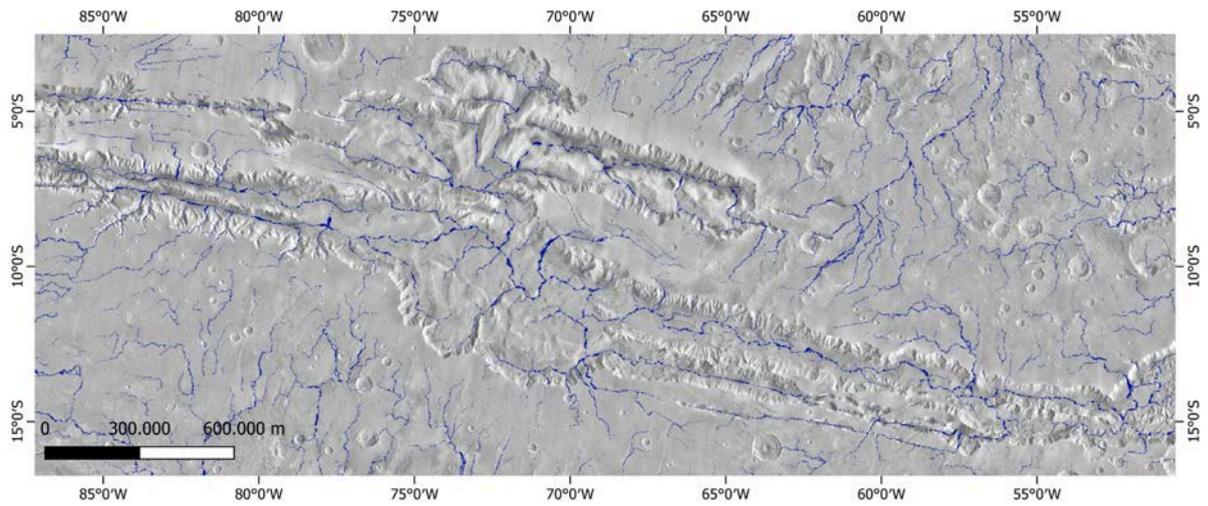


Figura 11: Análise geomorfológica da área de contribuição, evidenciando as principais drenagens do VM e seus padrões.

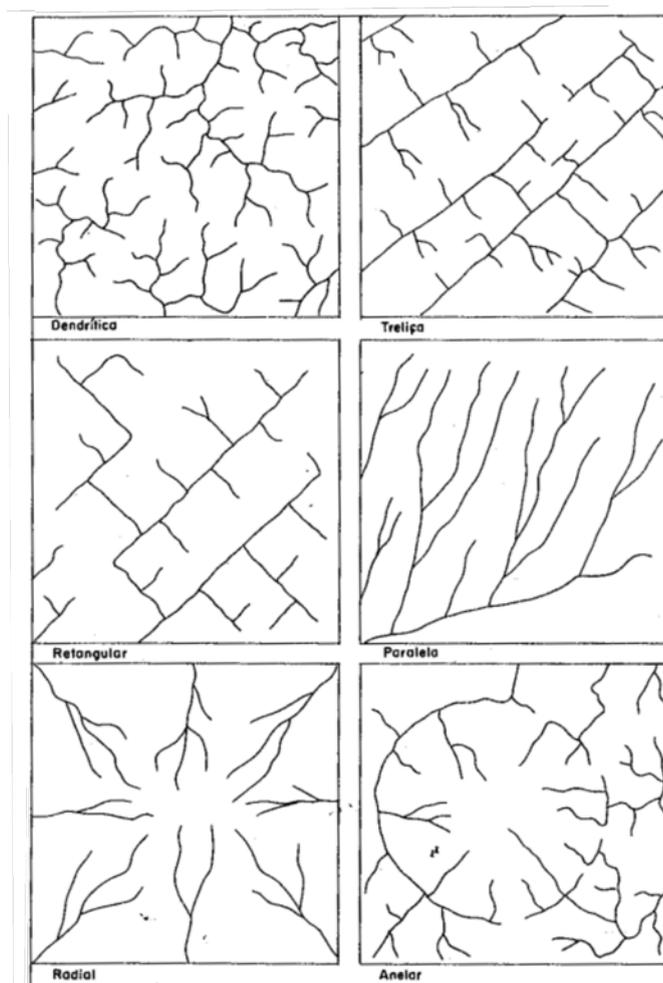


Figura 12: Disposição espacial dos principais tipos de de padrão de drenagens. Fonte: Christofletti (1980).

A partir da interpretação da imagem THEMIS, em conjunto com o atributo de perfil de curvatura, foi possível identificar que o Valles Marineris é composto por uma zona de falha principal, com uma crista no meio em IC e CO (Figura 13.A).

Além disso, em IC (Figura 13.B), observam-se regiões com maior densidade de lineamentos estruturais. Entre eles, destacam-se lineamentos encaixados em antigas drenagens, com deslocamento lateral na direção NE-SW, e diversos outros lineamentos na direção NW-SE, que deslocam as paleodrenagens e atravessam a crista, além de falhas conjugadas.

Em OP (Figura 13.C), foram identificadas falhas escalonadas e falhas com deslocamento lateral que também afetam as paleodrenagens. Já em CO (Figura 13.D), a maior parte dos lineamentos está concentrada na crista, apresentando diferentes direções.

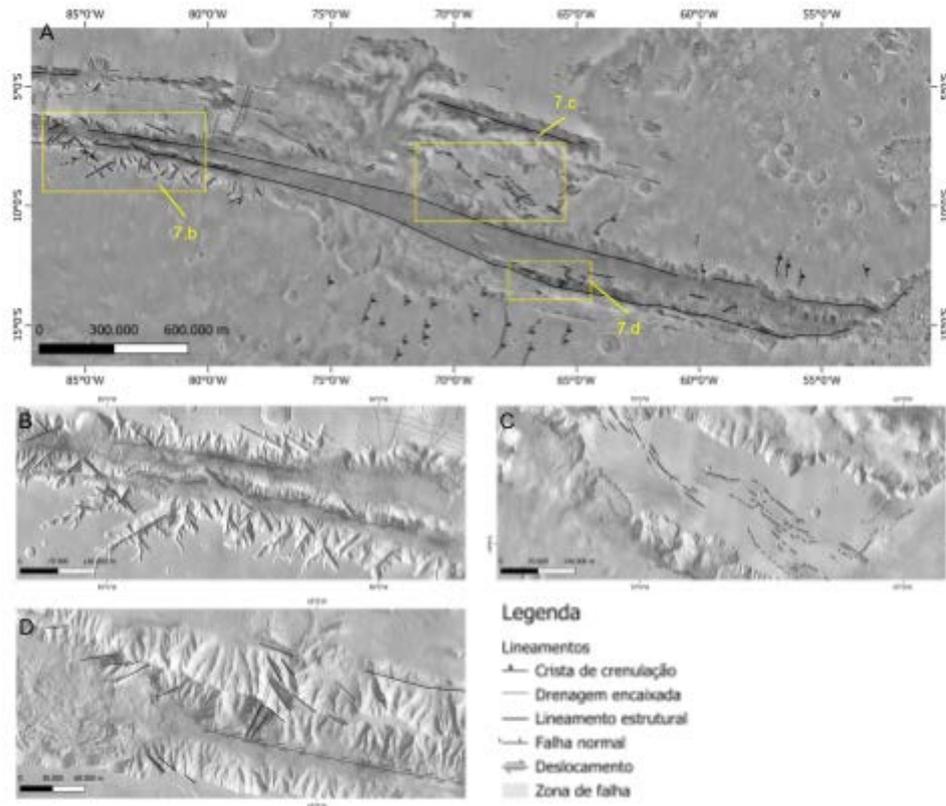


Figura 13: Interpretação dos principais lineamentos do VM, com o auxílio do atributo geomorfométrico de perfil de curvatura. **(A)** Mapeamento dos principais lineamentos do Valles Marineris com imagem THEMIS, com detalhe para regiões com maior densidade. **(B)** Lineamentos estruturais na região de Ius Chasma, com maioria de direção NW-SE e NE-SW. **(C)** Lineamentos na região de Ophir planum, controlando a paleodrenagem da região. **(D)** Lineamentos na região da crista de Coprates Chasma.

6.2 Morfoestruturas

Em todo o Valles Marineris foram observadas algumas morfologias específicas, sendo elas as paleodrenagens, encaixadas em lineamentos estruturais; cristas, deslocamentos laterais, lineamentos e escarpas, encontradas principalmente em IC (Ius Chasma), CO (Coprates Chasma) e OP (Ophir planum). Essas imagens foram analisadas com as imagens CTX, visualizando as estruturas em detalhe e os lugares onde foram identificadas. A seguir serão apresentadas as imagens e suas descrições referentes a essas morfologias.

6.2.1 Lineamentos em paleodrenagem

Os antigos canais fluviais de Marte (paleodrenagens), localizados principalmente nas laterais do Valles Marineris, podem ser encontrados por todo o sistema de vales, marcados por pequenos vales formando baixos topográficos e tornando visível essa rede de drenagens, com sua maior concentração estando em IC (mais a oeste do VM). Chama a atenção que muitos desses canais estão encaixados em lineamentos tectônicos, formando padrões escalonados (Figuras 16, 17, 18 e 19) e acabam sendo deslocadas por outros lineamentos menores (Figura 14), aparentemente posteriores a essas estruturas maior escala, ocorrendo com maior frequência na região de Ius Chasma. Esses lineamentos apresentam grande extensão, especialmente aqueles que atravessam o vale, seccionando a crista (Figuras 15 e 17), com comprimentos superiores a 100 km.

Na figura 14, observam-se lineamentos mais extensos de direção NE, evidenciando uma paleodrenagem encaixada nesses lineamentos, indicados por esses pequenos vales formando baixos topográficos e tornando visível a rede de drenagens, marcando os lineamentos. Estes lineamentos NE são proeminentes. É notável que esses lineamentos NE sejam intersectados por outros lineamentos de direção NW, evidenciando inclusive deslocamentos da antiga drenagem de direção NE.

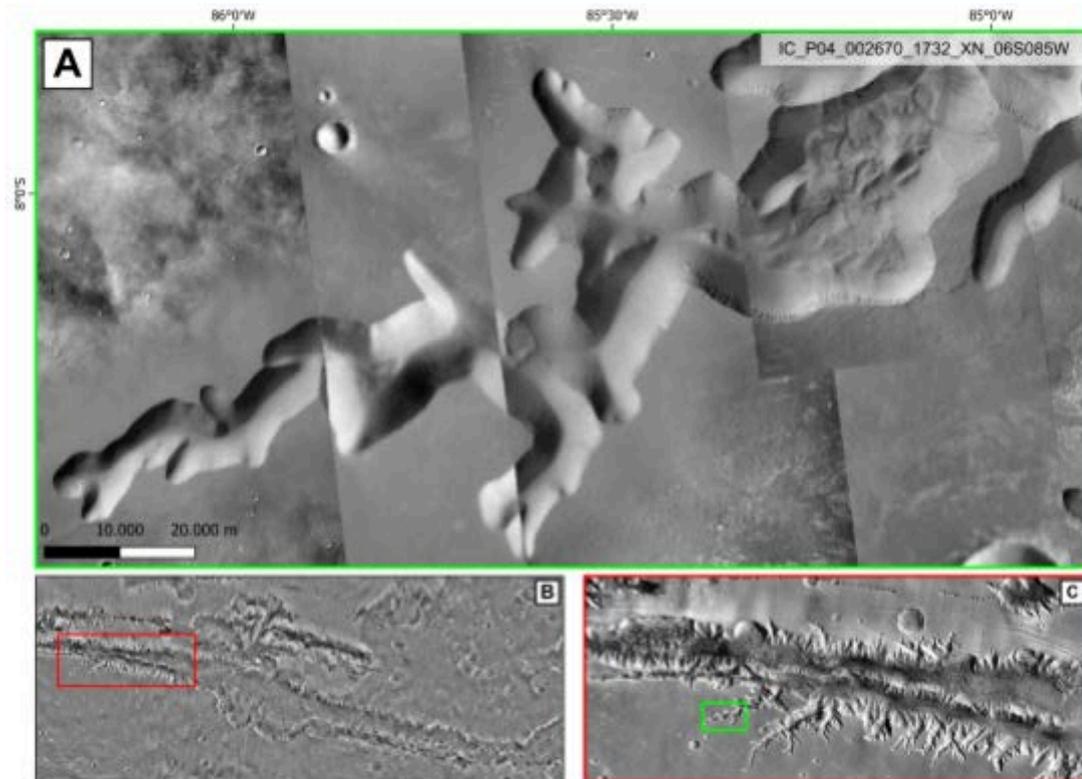


Figura 14: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE deslocados por outros lineamentos de direção NW na região plana da parte sul de IC mais a oeste **(A)** Paleodrenagem com deslocamento. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

A figura 15, uma continuação da figura 8 em direção ao interior do VM, trata-se de um detalhamento da rede de paleodrenagens encaixada em lineamentos. Nota-se que os lineamentos mais evidentes são os de direção NW, que inclusive cortam a crista presentes na porção central de IC, porém o deslocamento não é tão expressivo nesta imagem quanto na imagem anterior. Além disso observa-se lineamentos com direção NE, presentes na crista formando uma escarpa e na paleodrenagem a leste daquela analisada na figura 8, possivelmente indicando um deslocamento associado a zona de falha do VM.

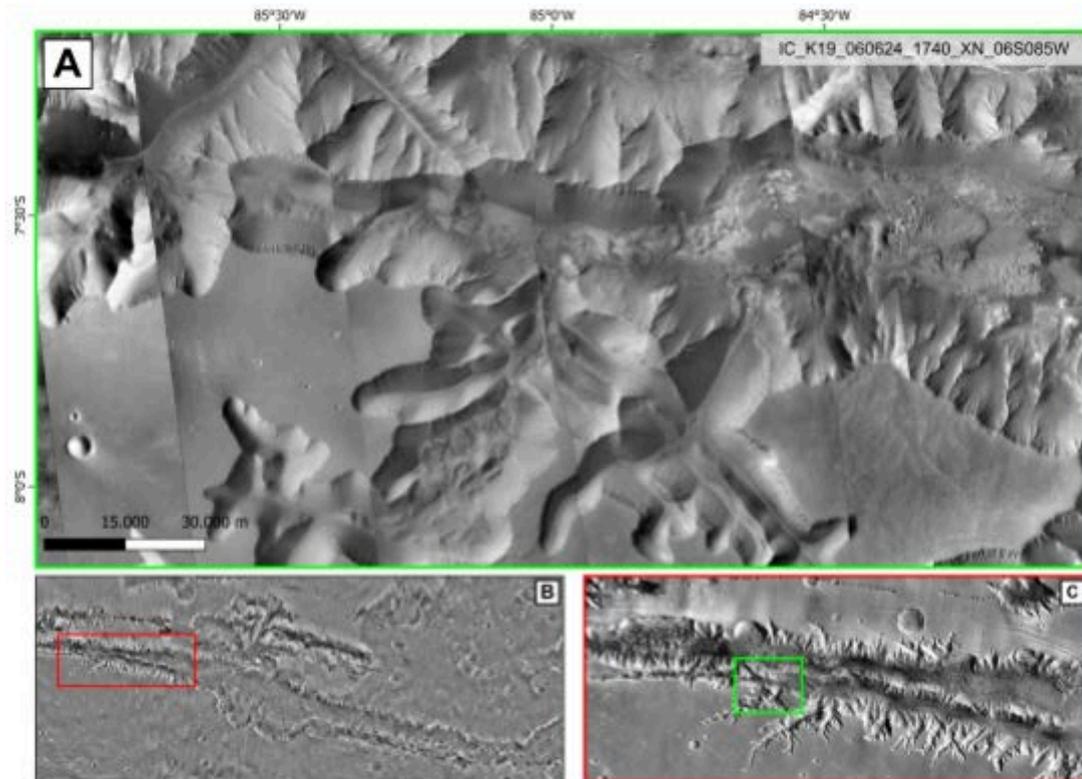


Figura 15: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE e NW, na região plana da parte sul de IC. **(A)** Paleodrenagens retilíneas com lineamento de direção NW cortando-as e cortando a crista no meio de IC **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Em direção ao leste do VM, a Figura 16 destaca com maior evidência os lineamentos de direção NW, especialmente na região plana da parte sul de IC, acompanhados pelas paleodrenagens analisadas nas figuras anteriores. No centro do painel A, observa-se uma sequência de lineamentos NW que formam um padrão escalonado, e nota-se no painel C, que esses lineamentos cortam a crista localizada no meio de IC. Entretanto, os deslocamentos provocados por esses lineamentos, visíveis na Figura 8, não são identificados nesta imagem.

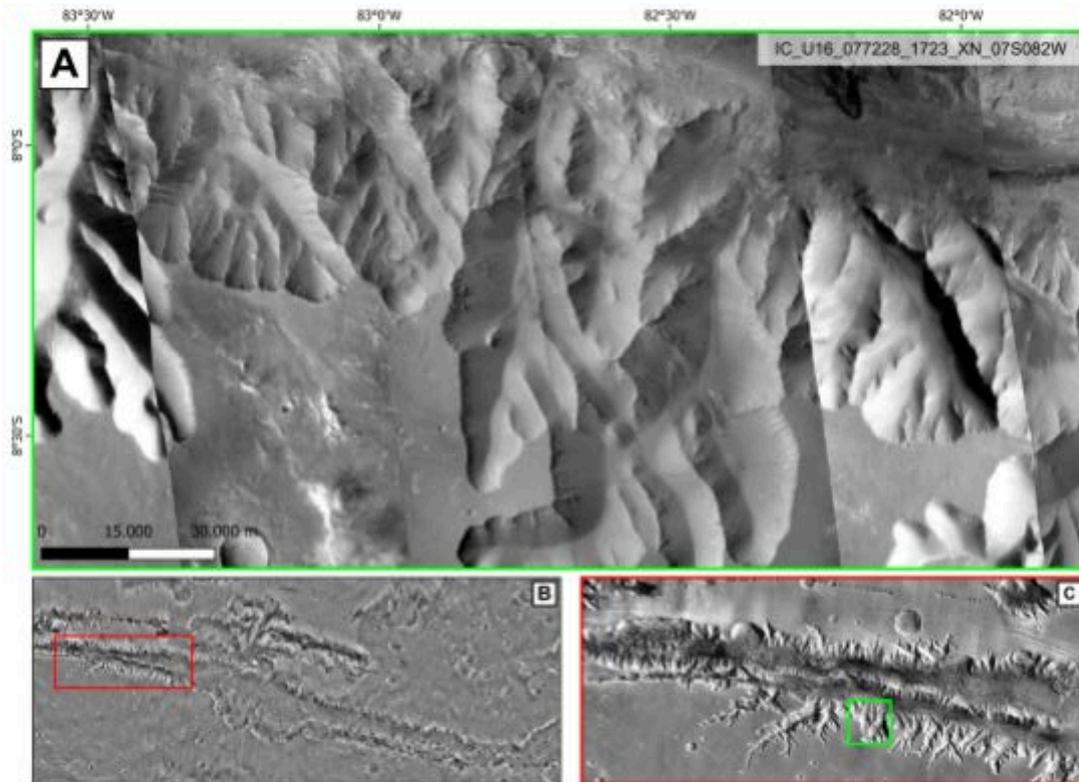


Figura 16: Paleodregens encaixadas em lineamentos de direção NW em sequência, na região plana da parte sul de IC. **(A)** Destaque para as paleodrenagens de direção NW em sequência, formando padrão escalonado. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

A leste da área mostrada na figura anterior, ainda na parte sul de IC, a Figura 17 destaca paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE dispostos em sequência. Além disso, observa-se um lineamento bem definido de direção NW, marcado por uma paleodrenagem que atravessa os demais lineamentos, possivelmente deslocando as drenagens de direção NE, ao analisar a continuidade dos seus vales.

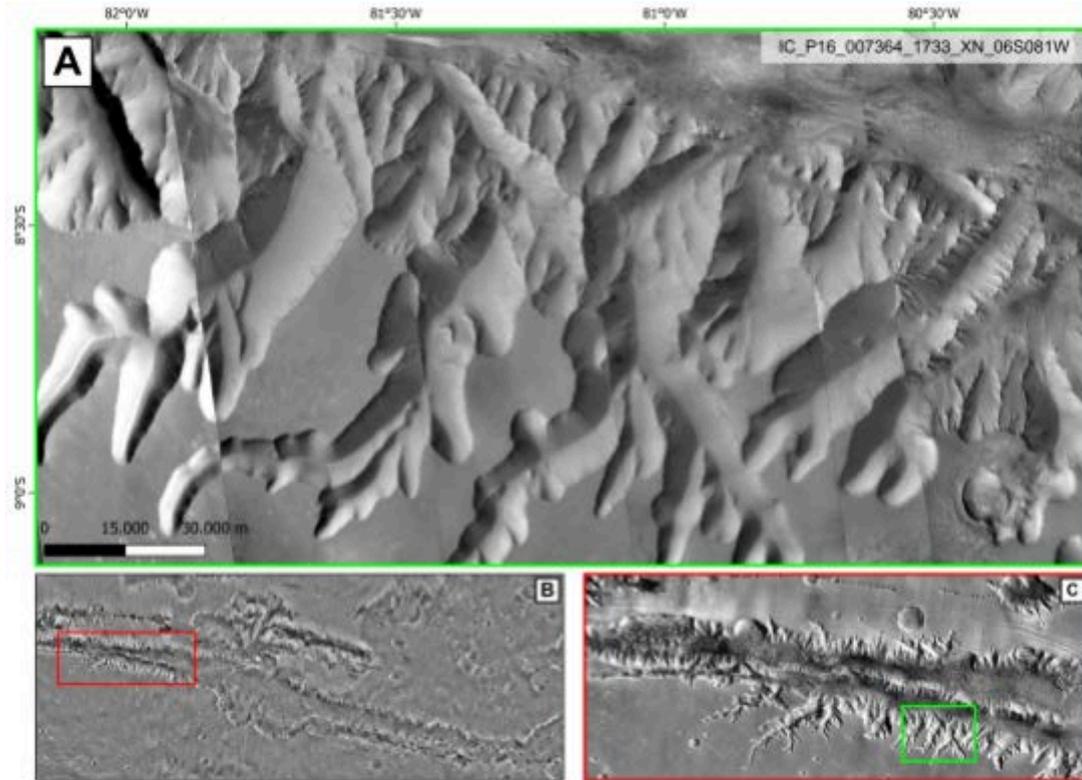


Figura 17: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE dispostos em sequência, cortados por um lineamento de direção NW na região plana da parte sul de IC mais a leste. **(A)** Destaques para os lineamentos NE sendo cortados por um lineamento NW. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Já na região plana da parte norte de IC em direção ao leste, na Figura 18 observa-se de forma mais evidente as paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW cortando os lineamentos de direção NE, assim como as figuras anteriores. No painel A, além do vale controlado pelas paleodrenagens, as escarpas presentes nos vales indicam as falhas em que essas drenagens estão encaixadas. No entanto, não se nota nenhum deslocamento dos lineamentos NE causado pelos lineamentos NW.

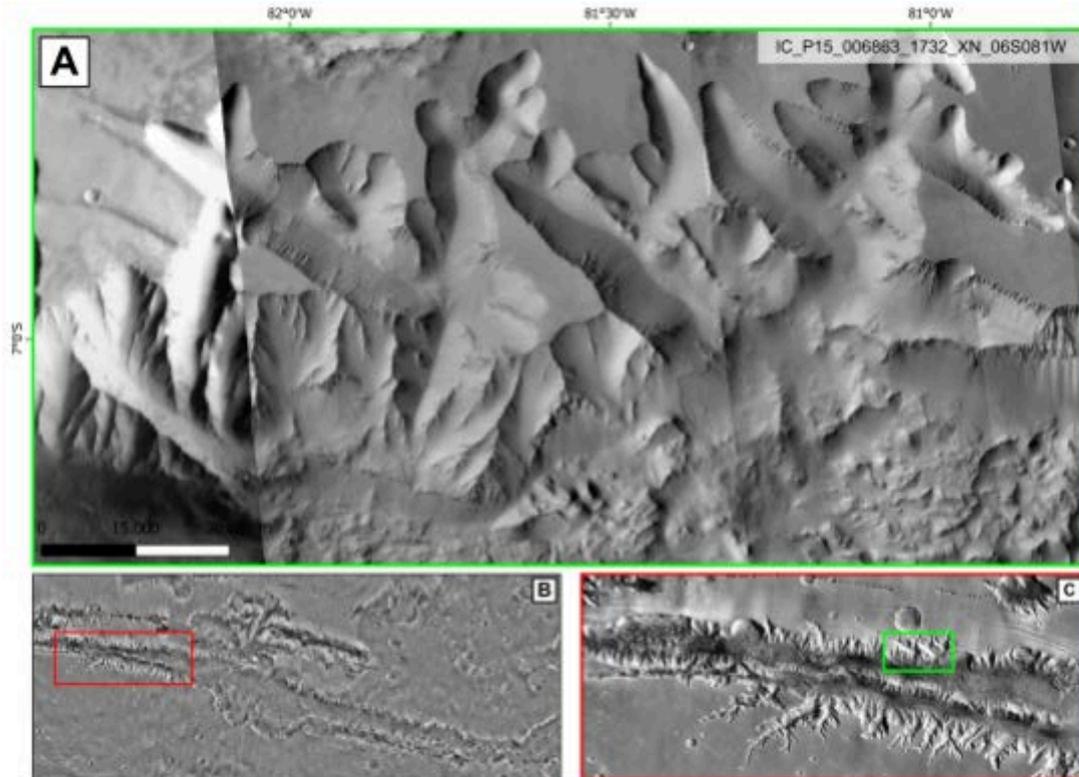


Figura 18: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NE e NW, localizado na região plana da parte norte de IC. **(A)** Destaque para os lineamentos NW cortando os lineamentos NE. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

No extremo leste de IC, na região plana da parte norte, praticamente inserida em MC, a Figura 19 destaca uma série de paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW, que interceptam o vale principal do VM. Ao analisar o painel A em conjunto com o painel C, observa-se que essa série de lineamentos apresenta um padrão escalonado, e que a paleodrenagem continua na região plana onde está inserida, em direção a NW, evidenciando uma possível estrutura na região.

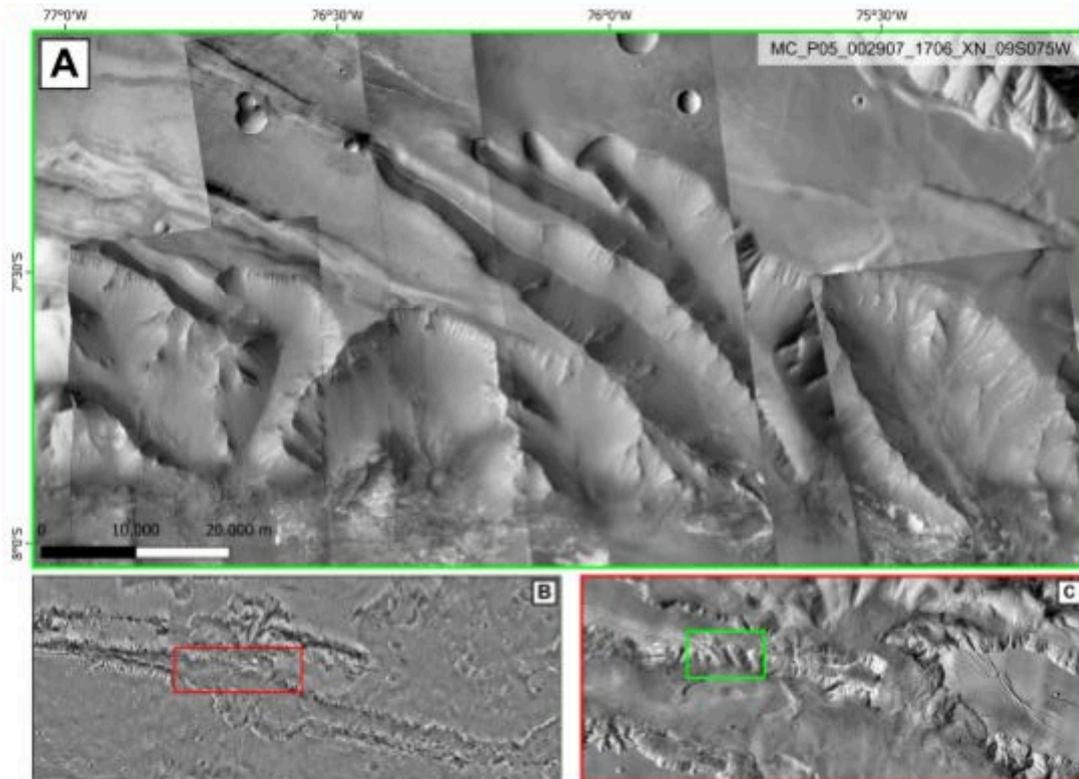


Figura 19: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW, na região plana ao norte de IC, próximo a MC. **(A)** Lineamentos de direção NW exibindo possível padrão escalonado. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Na Figura 20, localizada na região mais a oeste e ao sul de CO, é possível observar uma série de lineamentos de direção NW na parede sul de CO (painel A), com início na região plana, onde se manifestam como paleodrenagens encaixadas nesses lineamentos. Nota-se a continuidade desses lineamentos em direção ao interior do vale, formando escarpas tanto na parede sul de CO quanto dentro do próprio vale. Essa extensão reforça a importância desses lineamentos, semelhante ao que foi observado nas figuras anteriores. Não há evidências de deslocamentos causados pelos lineamentos de direção NW. No entanto, a presença dessas estruturas em uma área além de IC evidencia sua ocorrência ao longo de todo o sistema principal do Valles Marineris (Ius-Melas-Coprates).

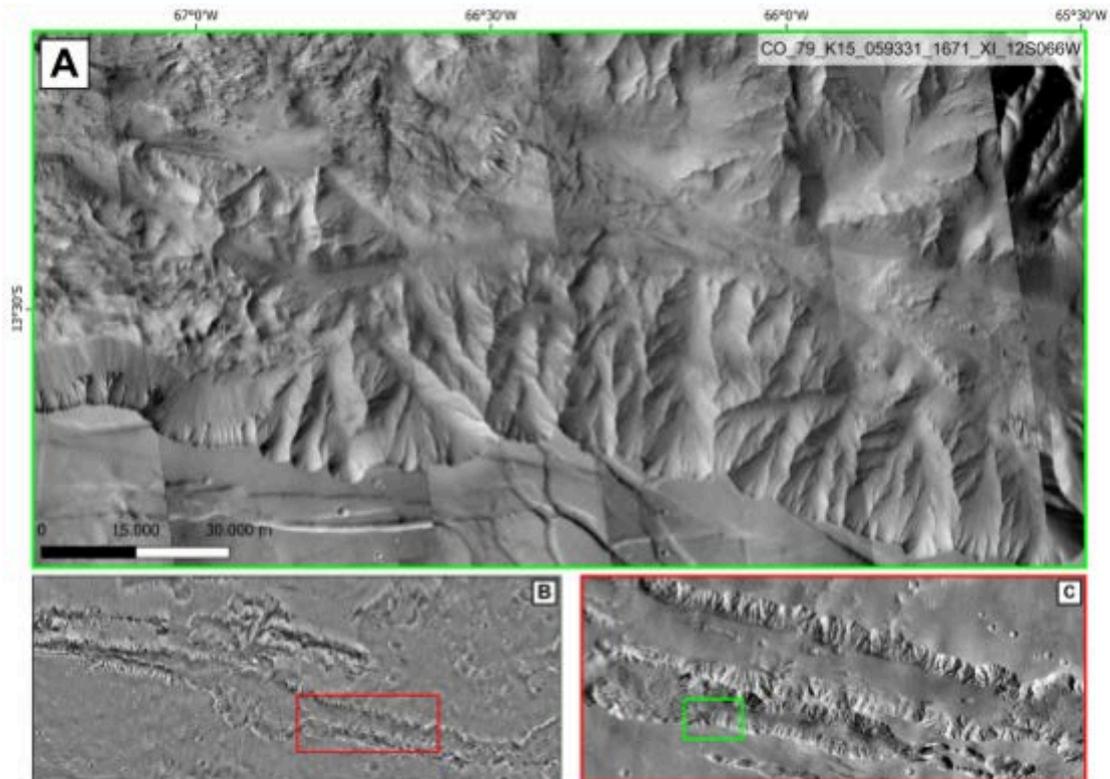


Figura 20: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW em CO, na porção mais a oeste e ao sul, com geração de escarpas dentro do vale. **(A)** Destaque para os lineamentos NW e as escarpas geradas por eles dentro do vale de CO. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A..

6.2.2 Crista

Na crista que divide o sistema de vale principal (Ius-Melas-Coprates) em dois, localizada em IC (Ius chasma) e CC (Coprates chasma), ao longo dela foram identificadas diversas estruturas e lineamentos. Entre eles, destacam-se facetas triangulares, falhas escalonadas que provocam a rotação de segmentos da crista (Figura 24), rupturas com deslocamento causadas por lineamentos que a atravessam (Figuras 22, 24 e 28). Em locais pontuais, é possível interpretar a cinemática das falhas com base nos deslocamentos observados, como ilustrado nas Figuras 24 e 28.

Adicionalmente, foram registradas deformações na crista (Figura 26), apresentando um aspecto arqueado (Figuras 27 e 28), além de uma aparência

brechada nas partes centrais, evidenciado por um baixo topográfico no topo da crista (Figura 20), que remete a regiões de brechas típicas de zonas de falha.

Na Figura 21, localizada na crista de IC, na porção mais a oeste, observa-se, no painel A, uma sequência de lineamentos de direção ENE no topo da crista, formando um padrão característico de falhas escalonadas. Na porção mais a oeste dessas falhas, separada por uma possível escarpa de direção NE, há um alto topográfico em relação aos lineamentos. Nesta área, a crista mantém-se retilínea, sem evidências de deformações significativas.

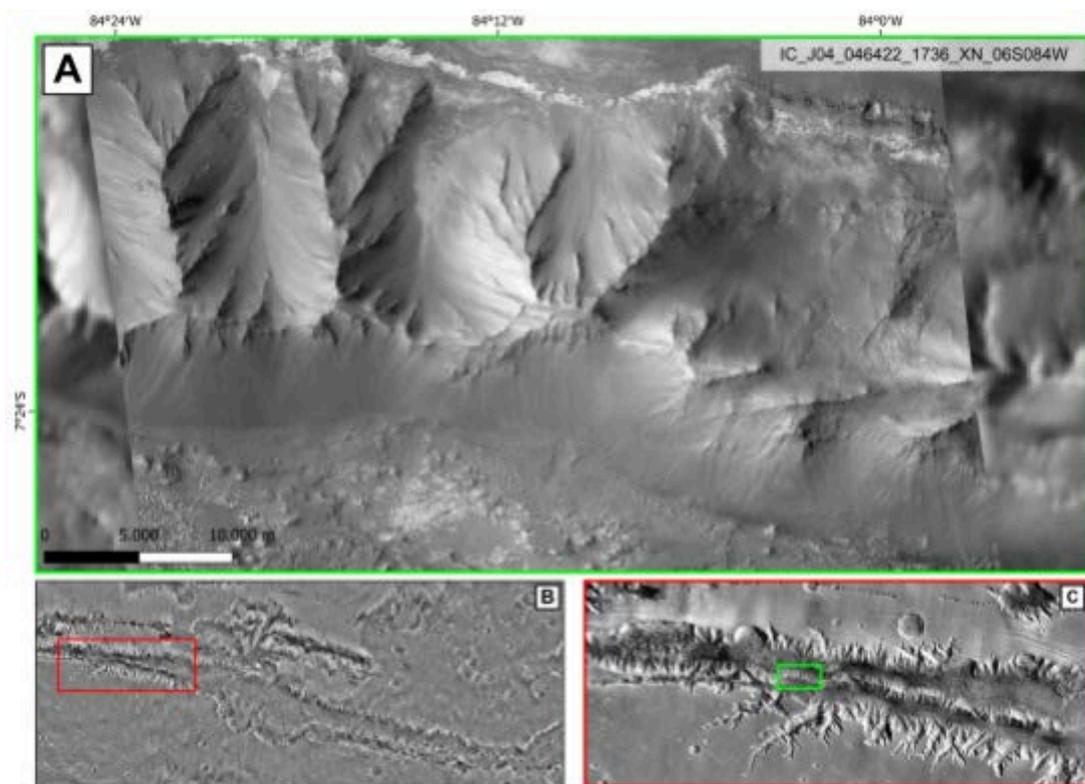


Figura 21: Crista na porção oeste de IC com sequência de lineamentos originando padrão escalonado. **(A)** Destaque da crista com as falhas escalonadas. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

A leste da área mostrada na figura anterior, a Figura 22 apresenta o outro lado da crista analisada na Figura 19, que foi cortada por lineamentos de direção NW. Esses lineamentos possivelmente correspondem aos descritos na Figura 16, que se estendem para o interior de IC. Embora a crista permaneça retilínea, observa-se um baixo topográfico em seu topo. Além disso, é visível uma escarpa de

direção NW em sua base, no vale entre as cristas representadas nas Figuras 21 e 22.

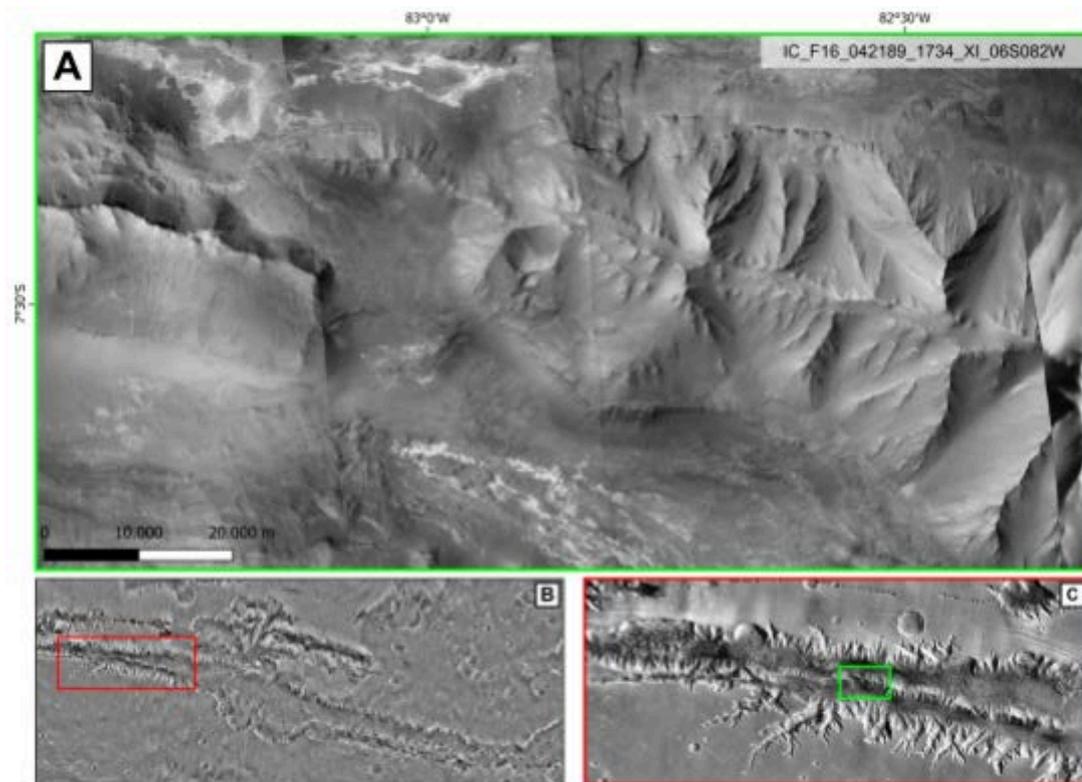


Figura 22: Crista cortada por lineamentos de direção NW. **(A)** Destaque para o espaço vazio entre as cristas, que foi cortado por lineamentos. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

A leste da Figura 22, seguindo pela mesma crista em IC, a Figura 23 destaca com maior clareza o baixo topográfico no topo da crista, que exibe um aspecto de brecha, semelhante ao observado em regiões brechadas de zonas de falha. No meio da crista, em seu topo junto a essa aparência brechada, há um lineamento visível de direção NW passando por toda a crista. Além disso, é possível identificar uma escarpa retilínea de alto ângulo localizada na base sul da crista juntamente com facetas triangulares, também na porção norte da crista.

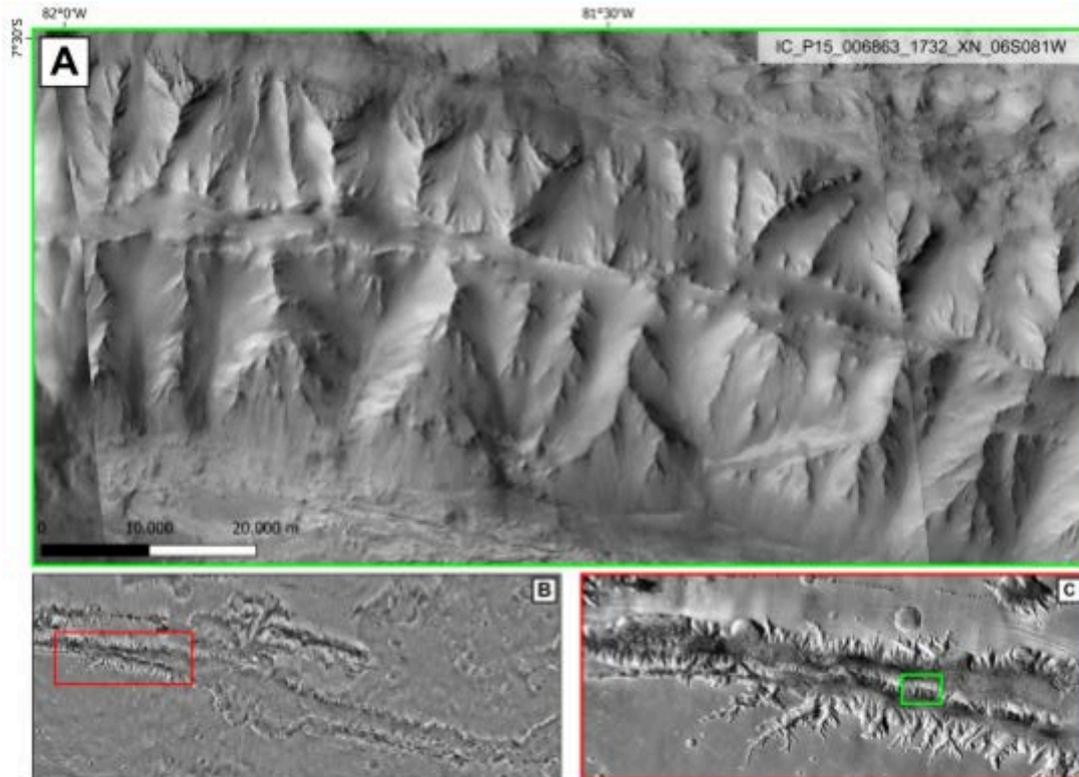


Figura 23: Crista em IC na porção leste, com aspecto brechado e lineamento de direção NW passando por ela, visível no topo, e escarpa retilínea em sua base sul. **(A)** Detalhe para a crista com aspecto brechado. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

A leste, na crista de IC, a Figura 24 apresenta essa estrutura sendo cortada por um lineamento de direção NW, semelhante ao observado na Figura 22, mas com um espaço vazio menor. No vale formado pelo lineamento NW, é possível identificar uma escarpa na crista com a mesma direção. Esses lineamentos, ao atravessarem a crista, podem estar associados àqueles de direção NW onde algumas paleodrenagens estão encaixadas, como referido anteriormente, em que uma porção desses lineamentos cortava a crista. Além disso, observa-se novamente a escarpa retilínea localizada na base sul da crista juntamente com facetas triangulares, reforçando a continuidade dessa feição tectônica nesta região.

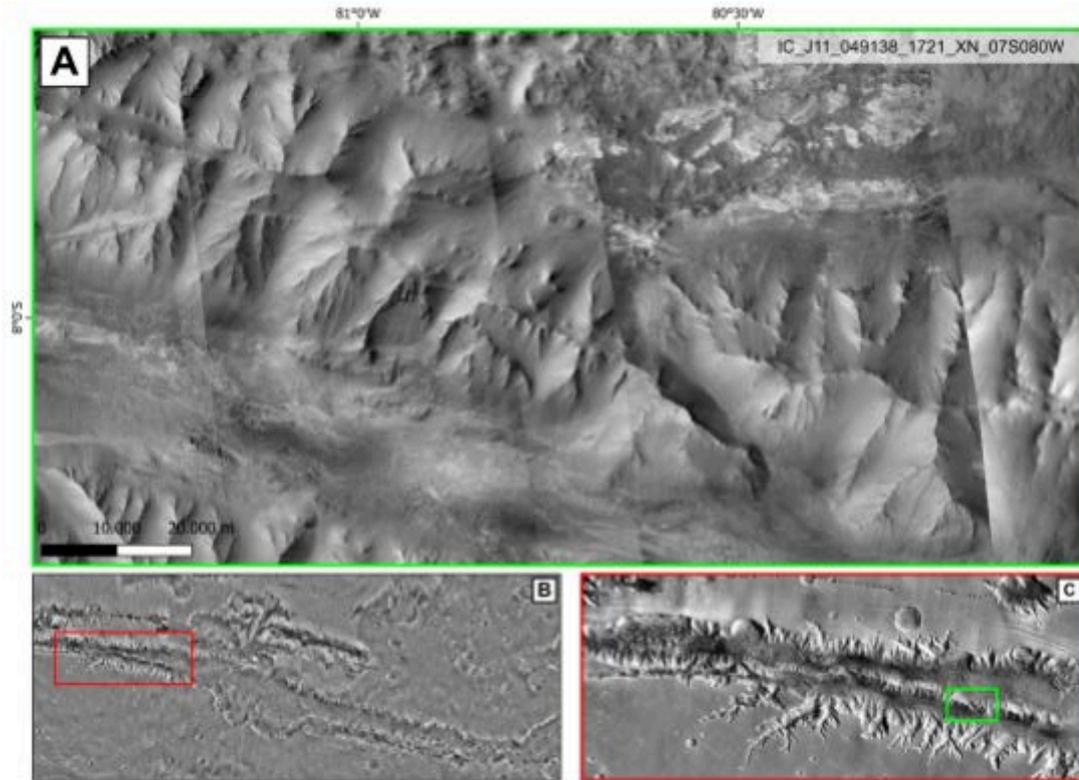


Figura 24: Crista em IC na porção mais a leste sendo cortada por lineamento de direção NW e escarpa na base sul da crista. **(A)** Destaque para a crista sendo cortada por lineamento NW. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

No final da crista, no extremo leste de IC, já adentrando em MC, a Figura 25 destacam-se lineamentos de direção NE no topo, marcados por uma mudança na posição do seu ápice. Além disso, permanece evidente a escarpa retilínea localizada na base sul da crista, reforçando sua continuidade estrutural.

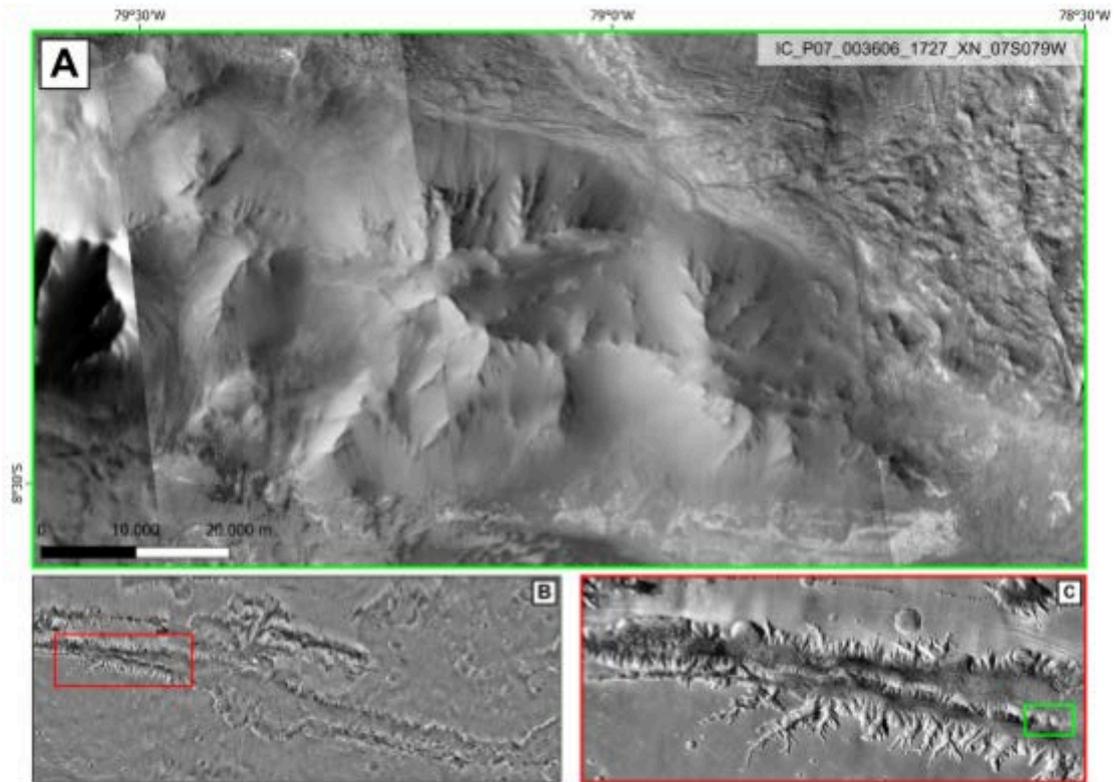


Figura 25: Crista no final de IC, com lineamentos de direção NE e escarpa retilínea na base sul da crista. **(A)** Destaque para a crista e lineamentos NE. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Na Figura 26, observa-se uma crista evidentemente deformada que divide MC e CA (Candor Chasma). Essa crista é uma extensão da região plana ao norte de IC, prolongando-se até a parte central de MC. Inicialmente apresenta-se de forma retilínea, mas é interrompida por um lineamento de direção NE, que forma um vale. Sua continuidade encontra-se ao sul do lineamento, apresentando uma deformação em formato de sigmoide, perceptível ao acompanhar o topo da crista. Dentro dessa deformação, destacam-se lineamentos menores de direção NE, que convergem para a quebra negativa e seguem a curvatura da deformação da crista, delimitando o sigmoide ao sul.

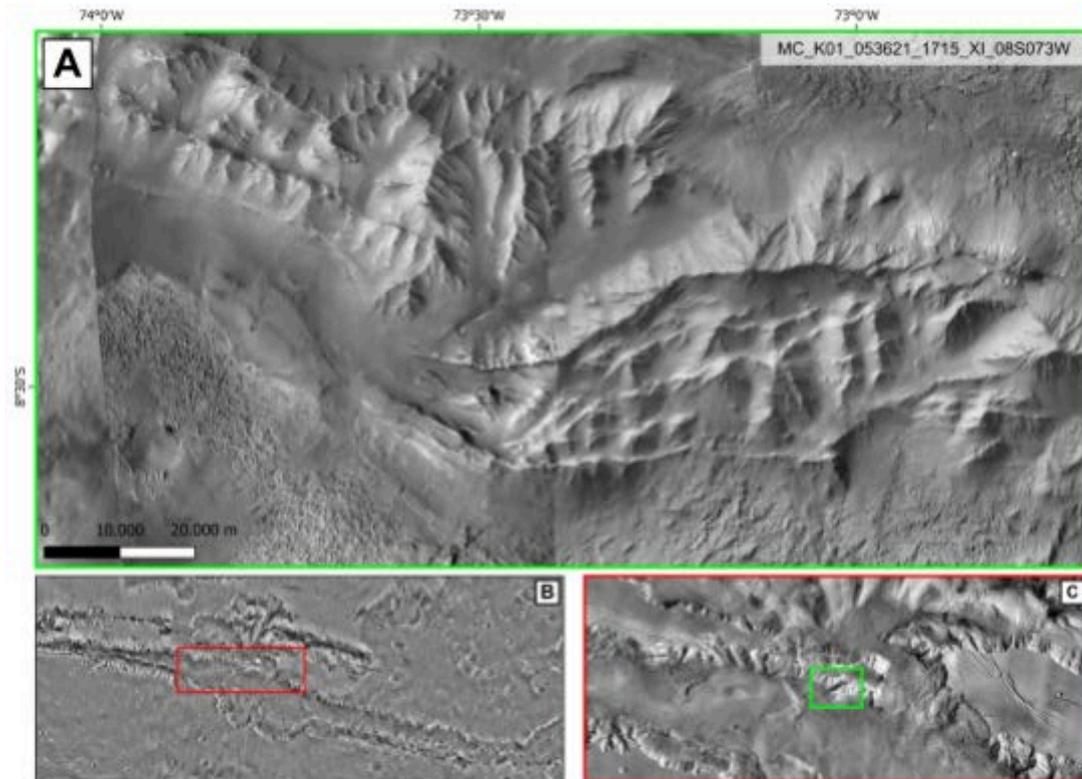


Figura 26: Crista deformada, que divide MC e CA. **(A)** Destaque para a crista deformada, com formato de sigmoide e lineamentos de direção NE. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Em CO, observa-se uma crista que pode ser a continuidade daquela analisada em IC. Na Figura 27, localizada no oeste de CO, a crista apresenta uma deformação com formato arqueado, cuja continuidade é interrompida por um lineamento de direção NE. O topo da crista reaparece um pouco ao sul, mantendo um formato levemente arqueado e estendendo-se ao longo da continuidade da crista em direção ao leste. Além disso, nota-se a presença de lineamentos de direção NE ao longo da crista, que podem ter contribuído para os desmoronamentos de terra visíveis na região. Outros lineamentos de direção NNE também são identificados na porção oeste do painel A da figura.

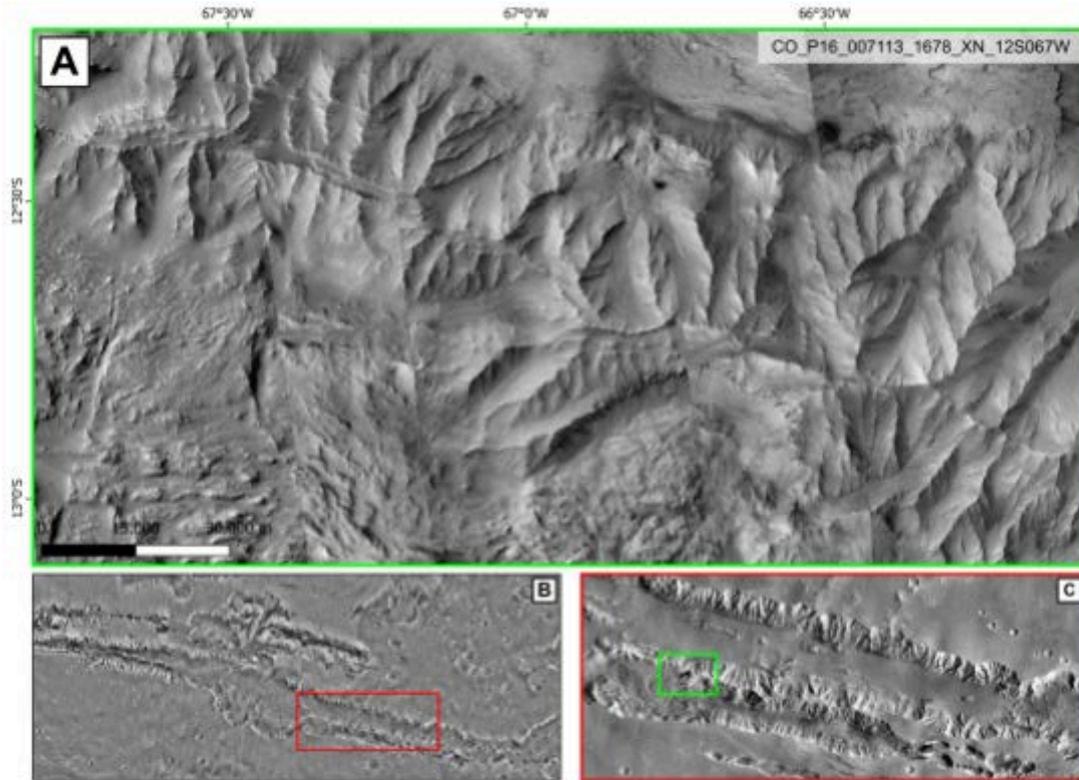


Figura 27: Crista na porção oeste de CO, deformadas de forma arqueada e cortada por lineamentos NE. Presentes desmoronamentos de terra e lineamentos NNE. **(A)** Destaque para cristas deformadas de forma arqueada, com lineamentos NE e desmoronamento de terra.. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Em direção ao leste em CO, na Figura 28, observa-se uma deformação na crista, causada por dois lineamentos de direção NW-SE que a seccionam . Em um desses lineamentos (mais ao centro do painel A, 13°S,65°W) há uma quebra positiva da crista orientada para SE, enquanto em outro lineamento há uma quebra positiva da crista orientada para NW. Essa configuração pode sugerir a existência de falha de direção NW com cinemática sinistral. Apesar dessas deformações, há um divisor de águas visível no topo da crista, entre os grandes lineamentos de direção NW-SE.

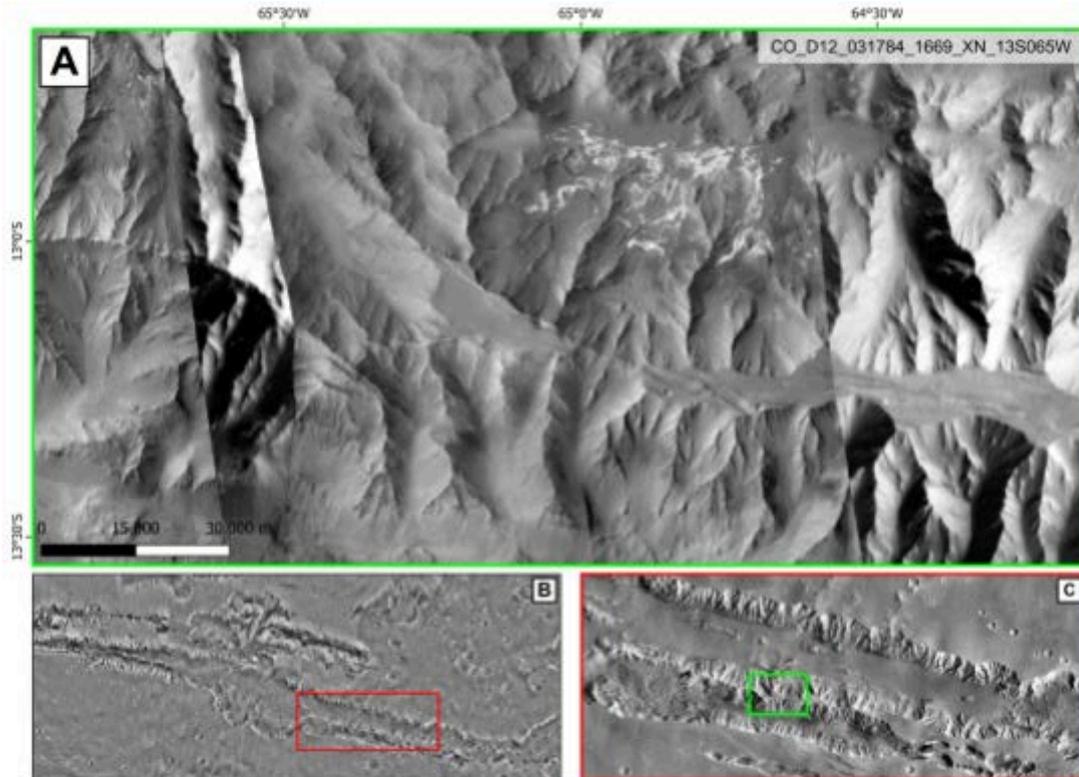


Figura 28: Crista em CO com lineamentos de direção NW, deformando a crista e indicando cinemática. **(A)** Destaque para crista deformada com lineamentos de direção NW, indicando cinemática. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

6.2.3 Deslocamento lateral

Em algumas partes do Valles Marineris, foram identificadas algumas estruturas com deslocamento lateral, como em Ophir planum (OP) e Coprates chasma (CO). Dentre elas, temos cristas deslocadas lateralmente (Figura 29 e 31) e em alguns casos gerando um padrão escalonado (Figura 30), além de em CO ter sido encontrado uma dobra de arrasto (Figura 32), indicando uma possível transcorrência na região.

Na Figura 29, em OP, uma planície elevada que separa CA (Candor chasma) e CO, observa-se um lineamento de direção ENE cortado por lineamentos de direção NE. Esse cruzamento desloca lateralmente a pequena escarpa para o sul, gerando um padrão escalonado composto por três lineamentos de direção ENE.

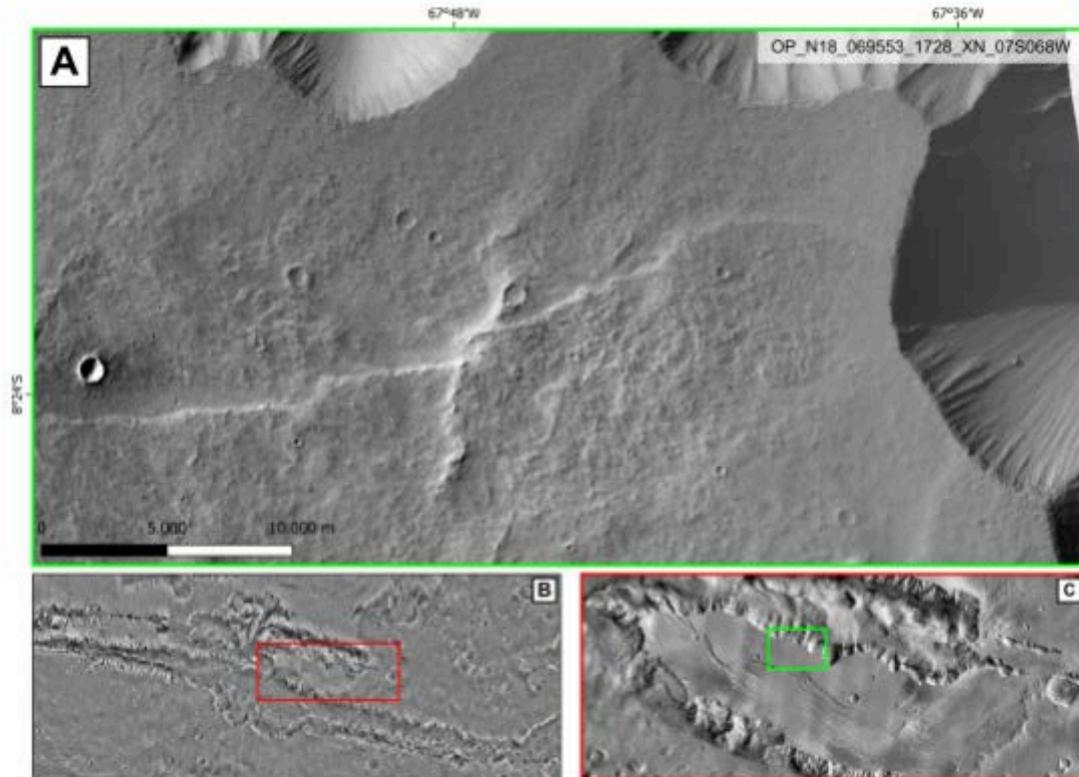


Figura 29: Evidência de deslocamento lateral em OP. **(A)** Destaque para a pequena crista deslocada lateralmente. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Na Figura 30, em OP, observam-se vários lineamentos de direção NW que formam sombras, possivelmente associadas a pequenas escarpas. Em um desses lineamentos, localizado mais a leste no painel A, nota-se que a escarpa apresenta um deslocamento lateral para a esquerda, causado pela interseção com lineamentos de direção WNW, gerando um padrão escalonado. Além disso, observa-se que os lineamentos NW contêm paleodrenagens encaixadas, que continuam e desembocam em outras drenagens também encaixadas nos lineamentos de direção WNW, evidenciando a interação geomorfológica entre os sistemas de paleodrenagem e as estruturas tectônicas.

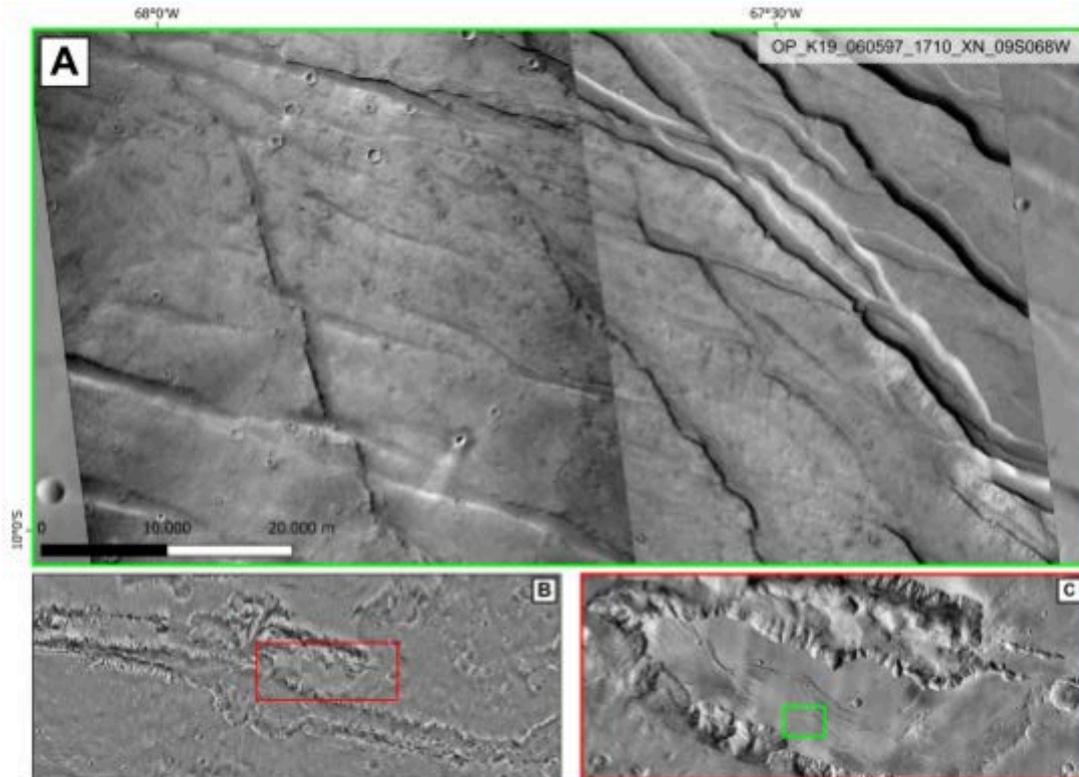


Figura 30: Paleodrenagens encaixadas em lineamentos de direção NW e WNW, com deslocamento lateral para esquerda. **(A)** Destaque para escarpa com deslocamento para esquerda gerando padrão escalonado. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Ainda em OP, a Figura 31 destaca uma crista contínua de direção NE, que apresenta dois deslocamentos laterais para a esquerda causados por lineamentos de direção NW. Essas estruturas abrigam paleodrenagens encaixadas, sendo o primeiro deslocamento o mais evidente, localizado próximo a uma cratera de impacto.

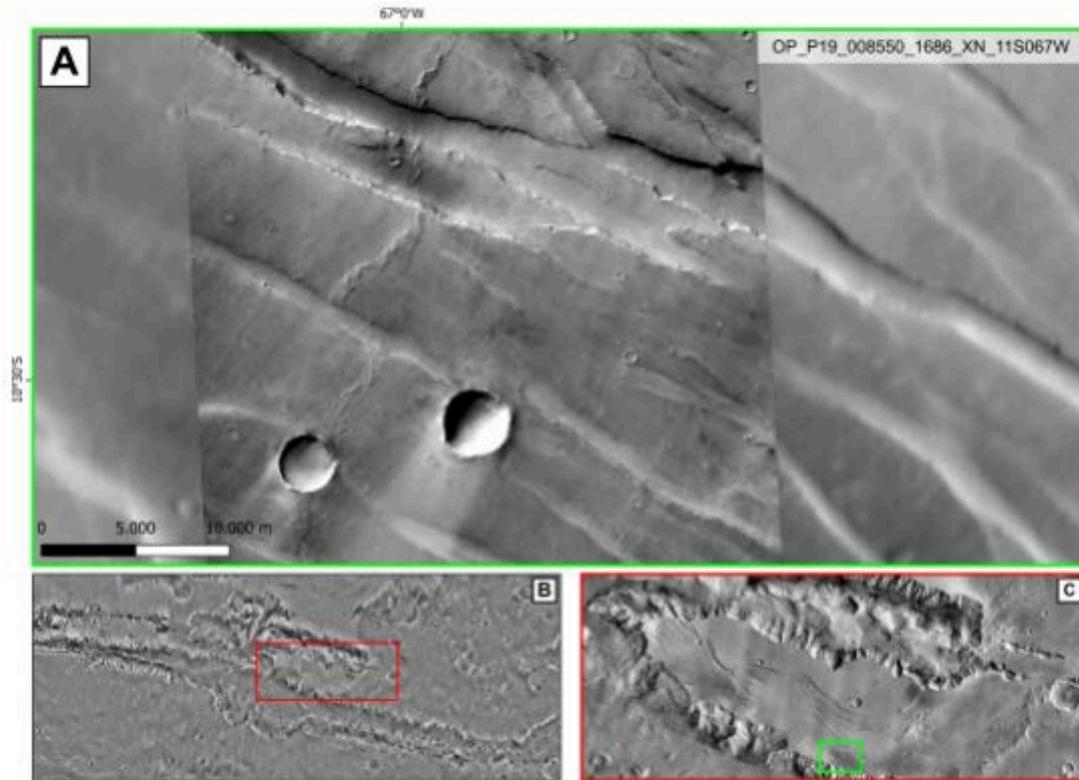


Figura 31: Crista em OP de direção NE com deslocamento lateral para esquerda, ocasionado por lineamentos de direção NW. **(A)** Destaque para crista com deslocamento lateral para esquerda . **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Em CO, foi identificada uma estrutura relevante associada a zonas transcorrentes. Na Figura 32, além do movimento de massa mais evidente, que forma um leque aluvial em tons mais claros, observa-se uma dobra de arrasto (em tons mais escuros) localizada logo acima desse leque aluvial, delimitada por um lineamento WNW. Esse lineamento pode representar uma falha transcorrente responsável pela formação das dobras. Destaca-se a presença de cristas possivelmente rochosas e dobradas na forma de dobra de arrasto, sendo inconfundível com o fluxo de sedimentos a baixo, além da delimitação por um lineamento. A geometria da dobra de arrasto reforça a hipótese de cinemática sinistral para a falha que a originou, podendo estar associado a falha principal do VM.

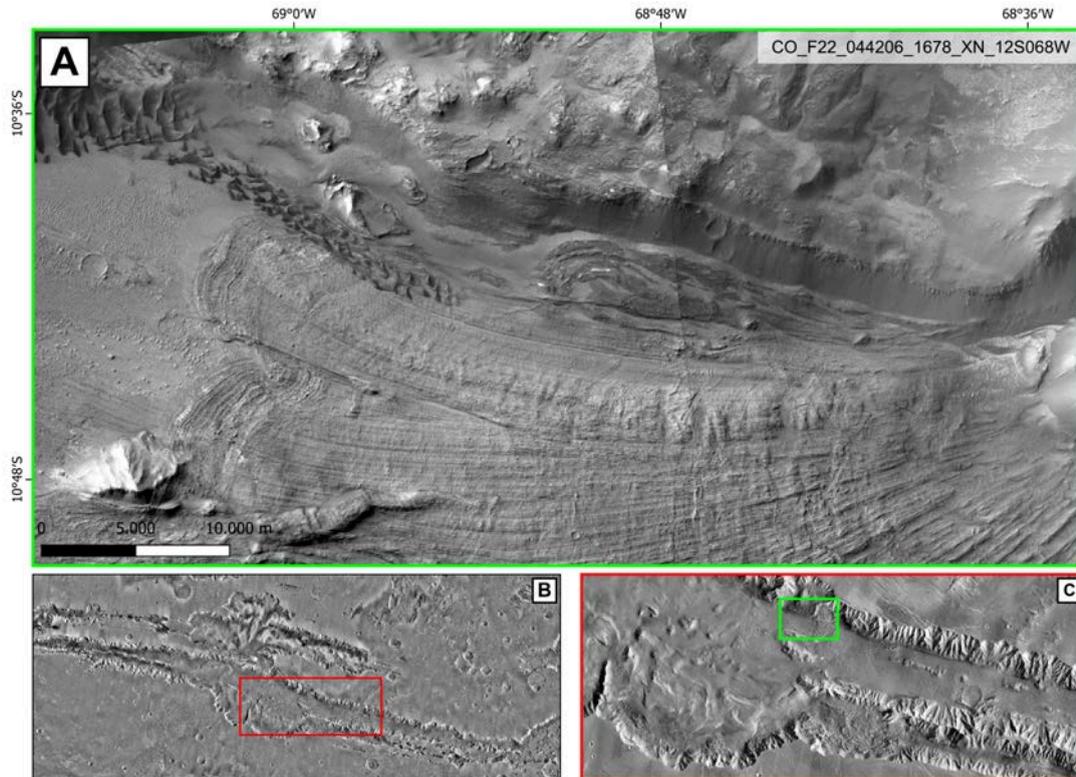


Figura 32: Região da escarpa de CO, com leque aluvial e dobra de arrasto delimitada por um lineamento WNW. **(A)** Destaque para a dobra de arrasto em tons escuros. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

6.2.4 Lineamentos

No interior do vale, principalmente no vale de IC (Ius Chasma), foram encontradas alguns lineamentos retilíneos (Figura 33) e em sequência formando um padrão escalonado (Figuras 34 e 35). Esses lineamentos são importantes para a interpretação das suas estruturas internas e sua formação.

Na Figura 33, localizada no extremo oeste de IC, observa-se um lineamento de direção NE soterrado por um deslizamento de terra, mas com continuidade visível nas paredes do vale. É provável que o deslizamento tenha tornado o lineamento mais evidente na paisagem, pois os movimentos de massa se assentam conforme as feições estruturais do local.

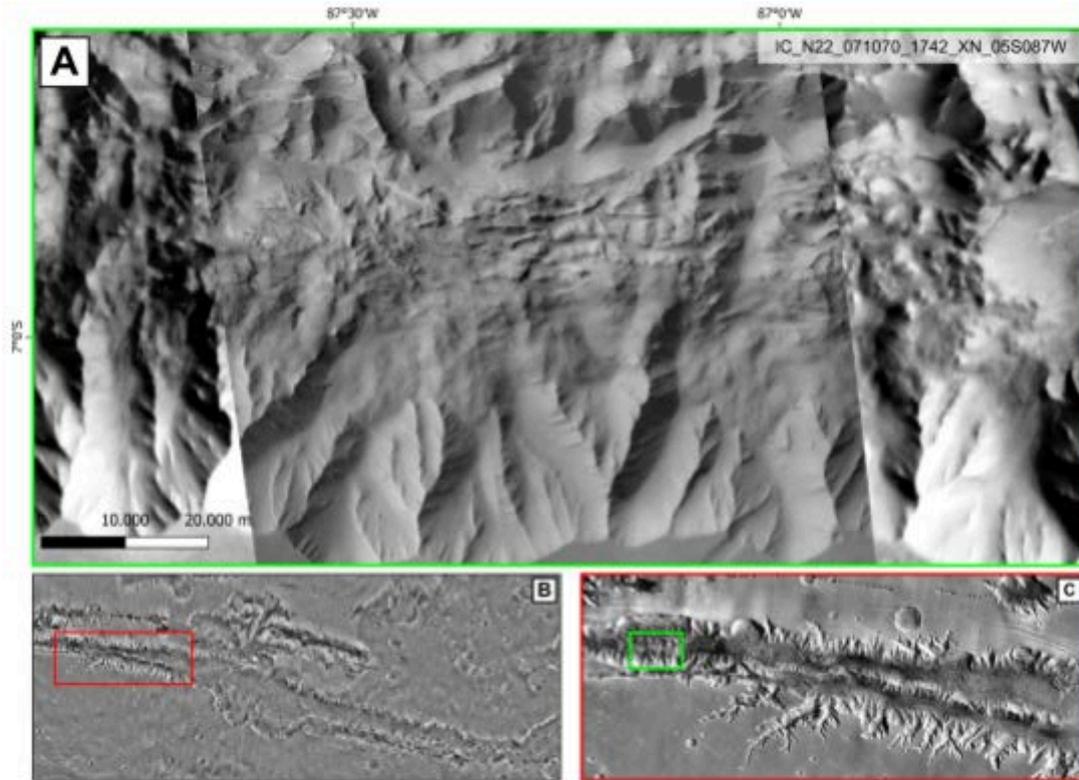


Figura 33: Lineamento de direção NE no extremo oeste de IC, soterrado por deslizamento de terra, deixando-o mais evidente. Observe sua continuidade nas paredes do vale. **(A)** Destaque para lineamento NE soterrado por deslizamento. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Ainda na porção oeste de IC, a Figura 34 destaca uma sequência de lineamentos de direção NE, organizados em um padrão escalonado. Nota-se sua continuidade em direção à parede do vale, e há indícios de que um deslizamento de terra tenha ocorrido nessa área, possivelmente contribuindo para evidenciar os lineamentos.

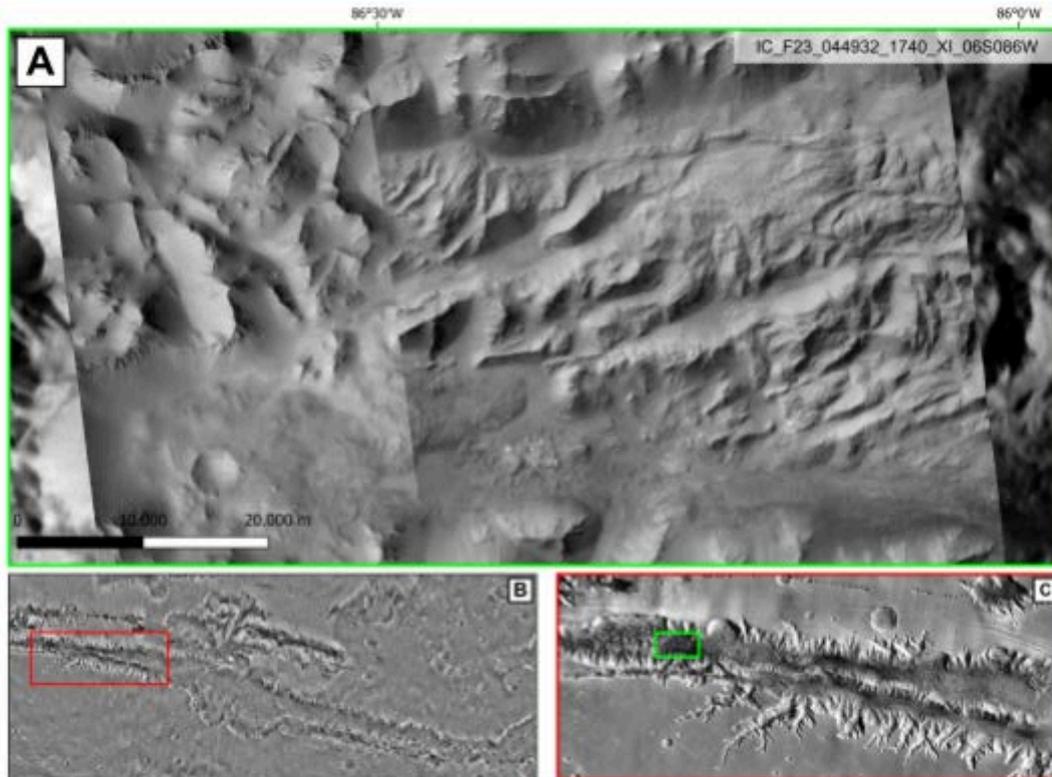


Figura 34: Lineamentos de direção NE em padrão escalonado. **(A)** Destaque para sequência de lineamentos NE formando padrão escalonado. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Na porção central de IC, a Figura 35 destaca uma série de lineamentos de direção NW organizados em um padrão escalonado, além de um morro na parte direita do painel A, que poderia estar associado a um cavalgamento que, por sua vez, teria soerguido essa estrutura. Também são identificados lineamentos de direção E-W, incluindo a própria parede do vale, que se caracteriza como escarpa. Além disso, nota-se um lineamento E-W que secciona e desloca para leste o lineamento NW localizado mais à esquerda do painel A, indicado pela flecha amarela.

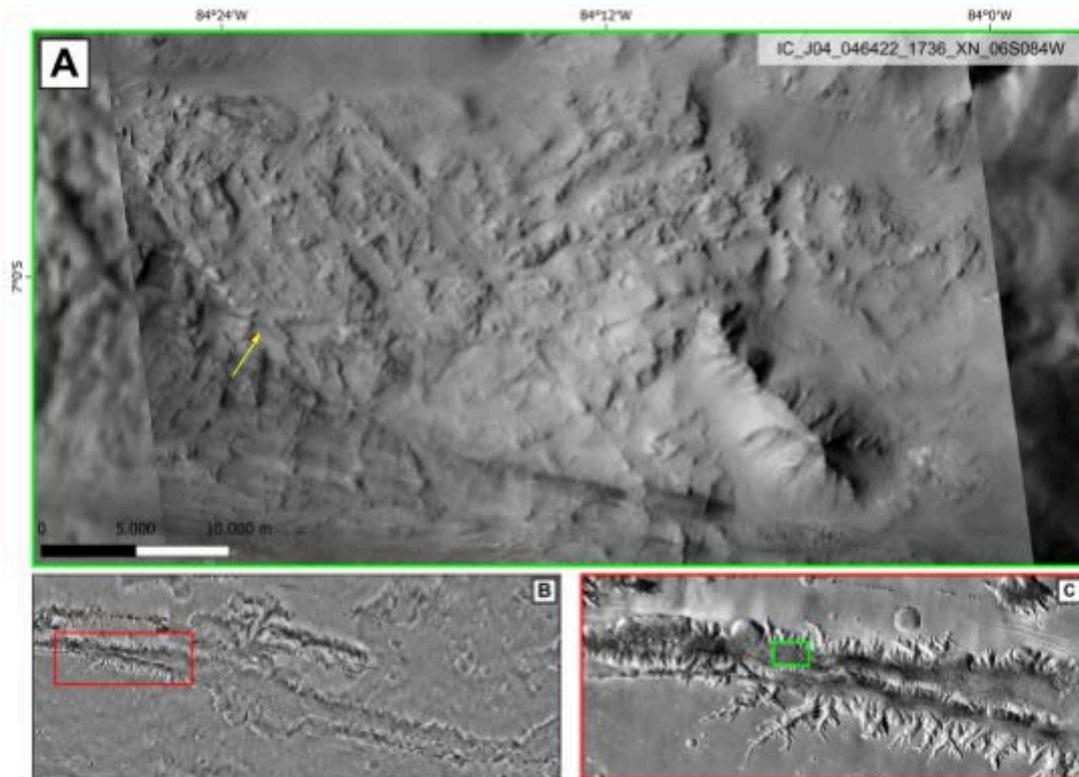


Figura 35: Lineamentos de direção NW escalonados na porção central de IC dentro do vale. Notar que também há lineamentos de direção E-W. **(A)** Destaque para lineamentos NW escalonados. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

6.2.5 Escarpas

Ao longo do VM foram identificadas estruturas retilíneas, principalmente em CO, classificadas como escarpas (Figura 36) e um possível talude (Figura 37).

Na Figura 36, observa-se um lineamento retilíneo de alto ângulo localizado na parede do vale, na porção oeste de CO. O lineamento é interpretado como uma possível escarpa, bastante expressiva e notável, inclusive na análise geomorfológica de perfil de curvatura realizada anteriormente.

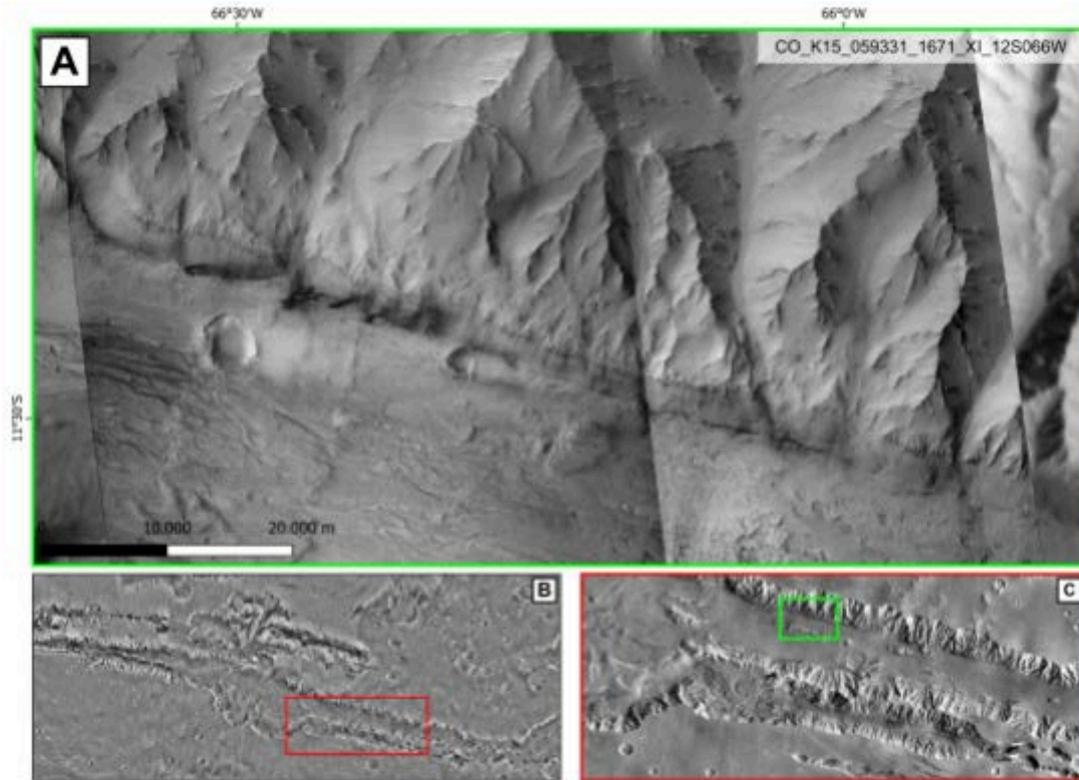


Figura 36: Escarpa retilínea na porção oeste de CO. **(A)** Destaque para escarpa retilínea. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

No extremo leste de Valles Marineris, em CO, a Figura 37 destaca lineamentos retilíneos marcantes ao longo da parede do vale, que podem ser interpretados como escarpas de ângulo alto. Essas estruturas se manifestam como desníveis abruptos na topografia, especialmente ao norte do painel A. Um aspecto notável é a mudança na direção da escarpa, que inicialmente segue uma orientação SE e, ao final, altera para NE. Essa transição é acompanhada pela formação de dois desníveis distintos ao longo da escarpa de direção NE, essa configuração se assemelha a feições observadas em taludes continentais terrestres.

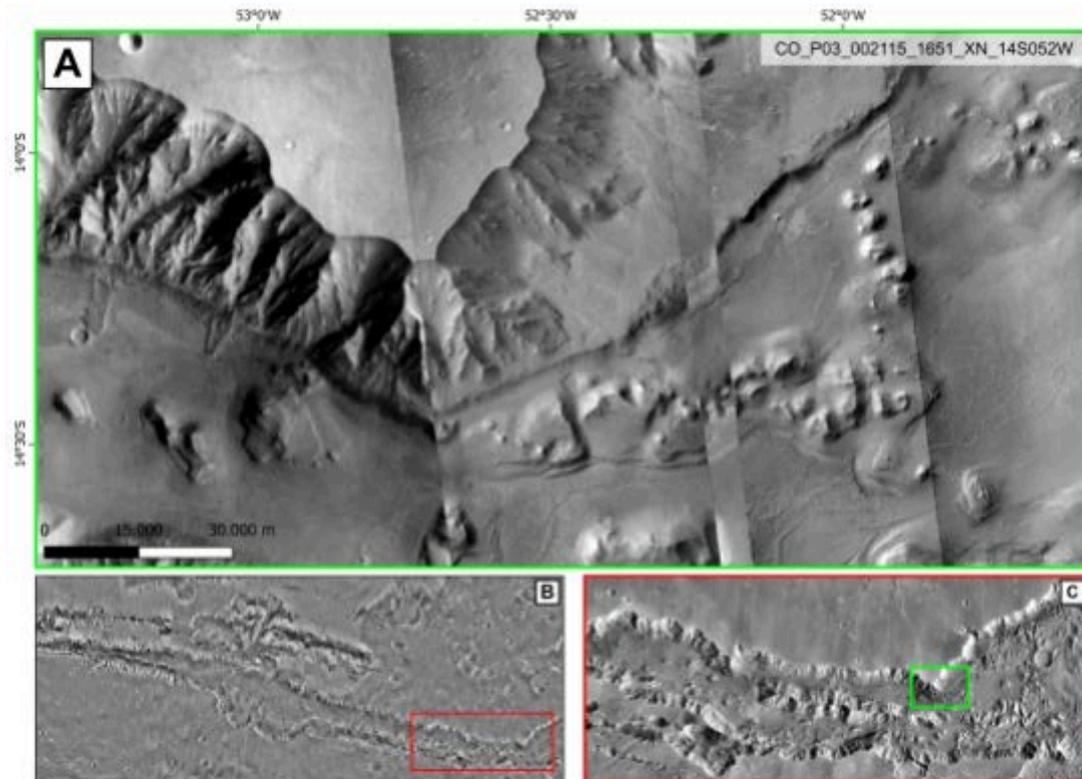


Figura 37: Escarpas retílineas no final do VM em CO. **(A)** Destaque para a mudança de direção da escarpa e a formação do talude. **(B)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(C)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

7. DISCUSSÃO

Este estudo amplia o entendimento sobre a evolução tectônica do Valles Marineris, que se mostrou complexa, revelando uma dinâmica estrutural que vai além das interpretações pioneiras de um regime extensional (Blausius, 1977; Frey, 1979; Schultz, 1991). As análises realizadas, com o uso de atributos geomorfométricos de perfil de curvatura, análise e interpretação de imagens THEMIS e CTX, mostraram evidências de estruturas associadas a um regime transcorrente, tais como falhas escalonadas de pequena escala (interior do vale) e grande escala (seccionando a crista em *Ius Chasma*), falhas conjugadas do tipo R e Y, conforme o modelo de Riedel proposto por Wilcox (1973), além de deslocamentos laterais de cristas e paleodrenagens com padrão escalonado e escarpas retilíneas. Indicativo de que o Valles Marineris pode ser um sistema transtensional, combinado com deformações transcorrentes e normais, corroborando com a interpretação de Yin (2012). Essa observação diverge da maioria dos estudos, principalmente aqueles publicados por Frey (1979), Schultz (1991) e Peulvast (2001), que consideram o Valles Marineris como um sistema de Rifts ou formado por processos erosivos.

O Valles Marineris apresenta uma grande quantidade de sedimentos, especialmente nas regiões de *Melas*, *Candor* e *Ophir Chasma*, o que sugere uma forte relação entre os processos tectônicos e a deposição sedimentar. Embora esses sedimentos frequentemente mascaram estruturas tectônicas subjacentes, a presença de deslizamentos em áreas como *Ius Chasma* (Figura 30) expõe feições tectônicas soterradas. Isso reforça a hipótese de que os processos tectônicos e sedimentares ocorreram de forma simultânea, interagindo para moldar a paisagem atual.

No sistema de cânions principais (*Ius-Melas-Coprates Chasma*), por meio da geomorfometria foram identificadas escarpas retilíneas e falhas escalonadas, especialmente em IC, tanto no interior do vale quanto, de maior porte, como lineamentos com padrão escalonado que atravessam a crista. Esse padrão pode ser interpretado com base no modelo de Riedel, indicando um controle direto pelo regime transcorrente. Além das drenagens geradas, é possível identificar os

principais padrões de drenagens segundo Christofolletti (1980) (Figura 38) , dentre eles, aqueles que indicam o regime transcorrente como a treliça.

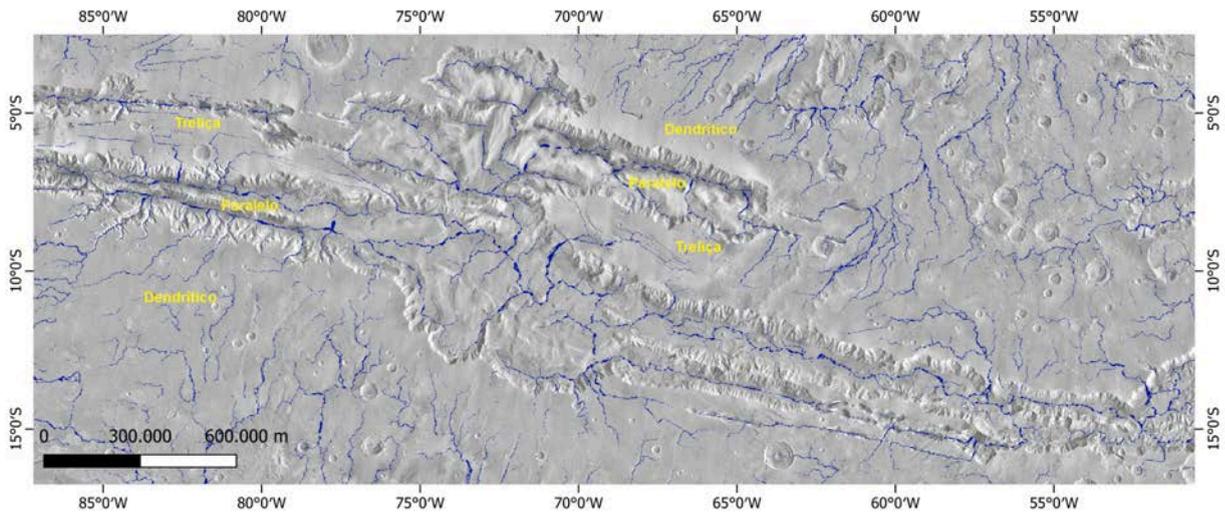


Figura 38: Padrões de drenagens principais no VM.

A presença de falhas escalonadas alinhadas com o modelo de Riedel reforça essa interpretação, conforme ilustrado na Figura 39, onde foram interpretadas falhas transcorrentes sinistras de direção NW que atravessam o vale de IC seccionando a crista em seu meio e a deformando. Tais falhas mostram um padrão escalonado e indicam possível cinemática sinistral inferida pelos deslocamentos e cortes da crista. Paleodrenagens estão encaixadas na planície alta e mostram a continuidade e a extensão dessas falhas, conforme descrito no tópico 6.2.1.

Uma morfologia muito comum nas cristas do VM presentes em IC e CO, são facetas triangulares juntamente com escarpas retilíneas na base da crista (Figura 40). Pois, segundo Burbank e Anderson (2001) as facetas triangulares são comuns em zonas de falhas transcorrentes, devido ao soerguimento da escarpa e erosão fluvial, onde os rios que fluem através da falha partindo do soerguimento, tendem a dissecar a frente da montanha, enquanto as falhas ativas tendem restaurar seu caráter retilíneo. Como Marte teve um período curto de atividade hidrológica, as facetas ficaram mais evidentes devido à falta da evolução da bacia hidrográfica, pois o espaçamento das facetas reflete na evolução das bacias de drenagem dentro do bloco da escarpa.

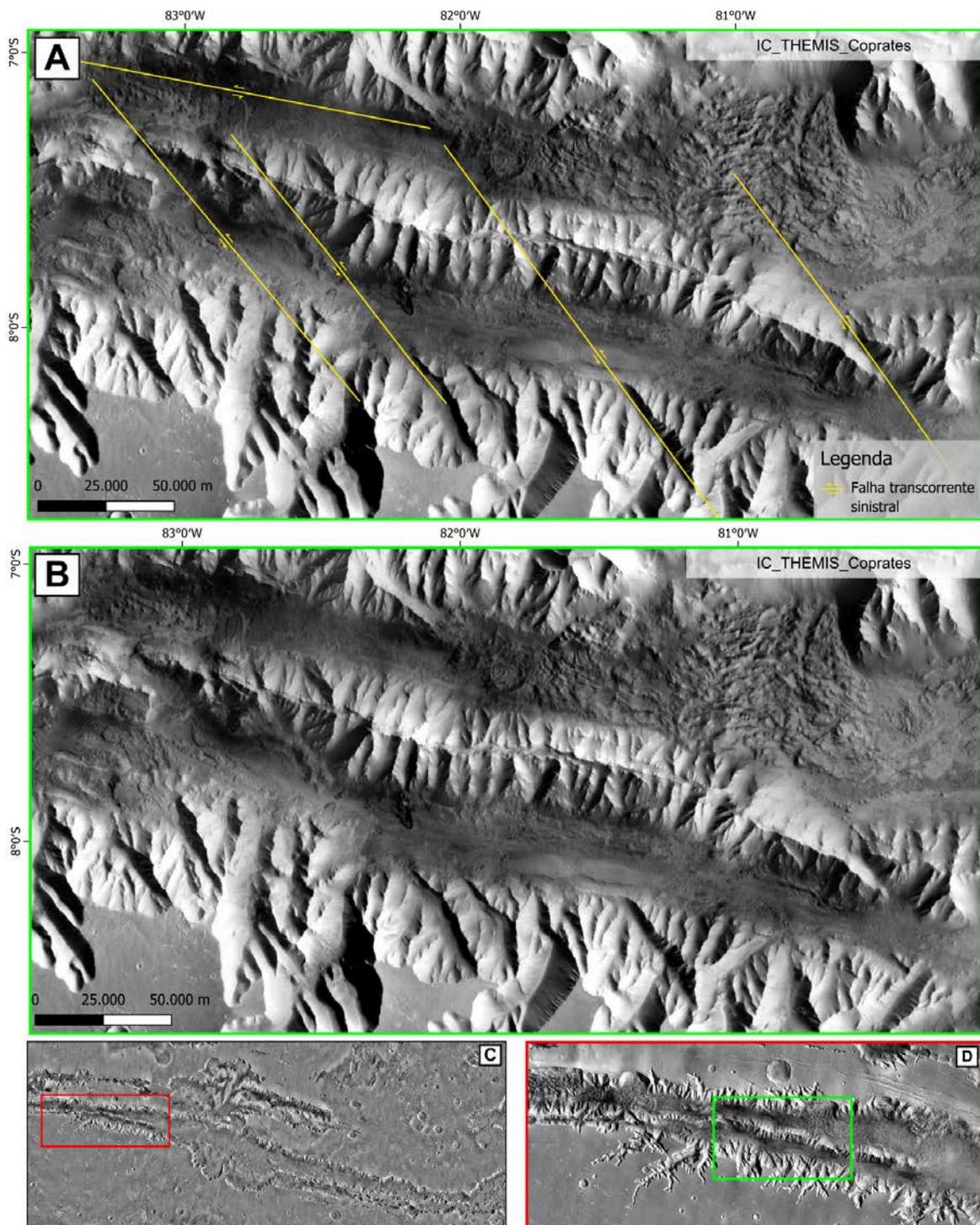


Figura 39: Falhas de grande extensão com padrão escalonado atravessando o vale de IC e seccionando a crista. **(A)** Interpretação da região, evidenciando as falhas escalonadas. **(B)** Imagem não interpretada. **(C)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(D)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

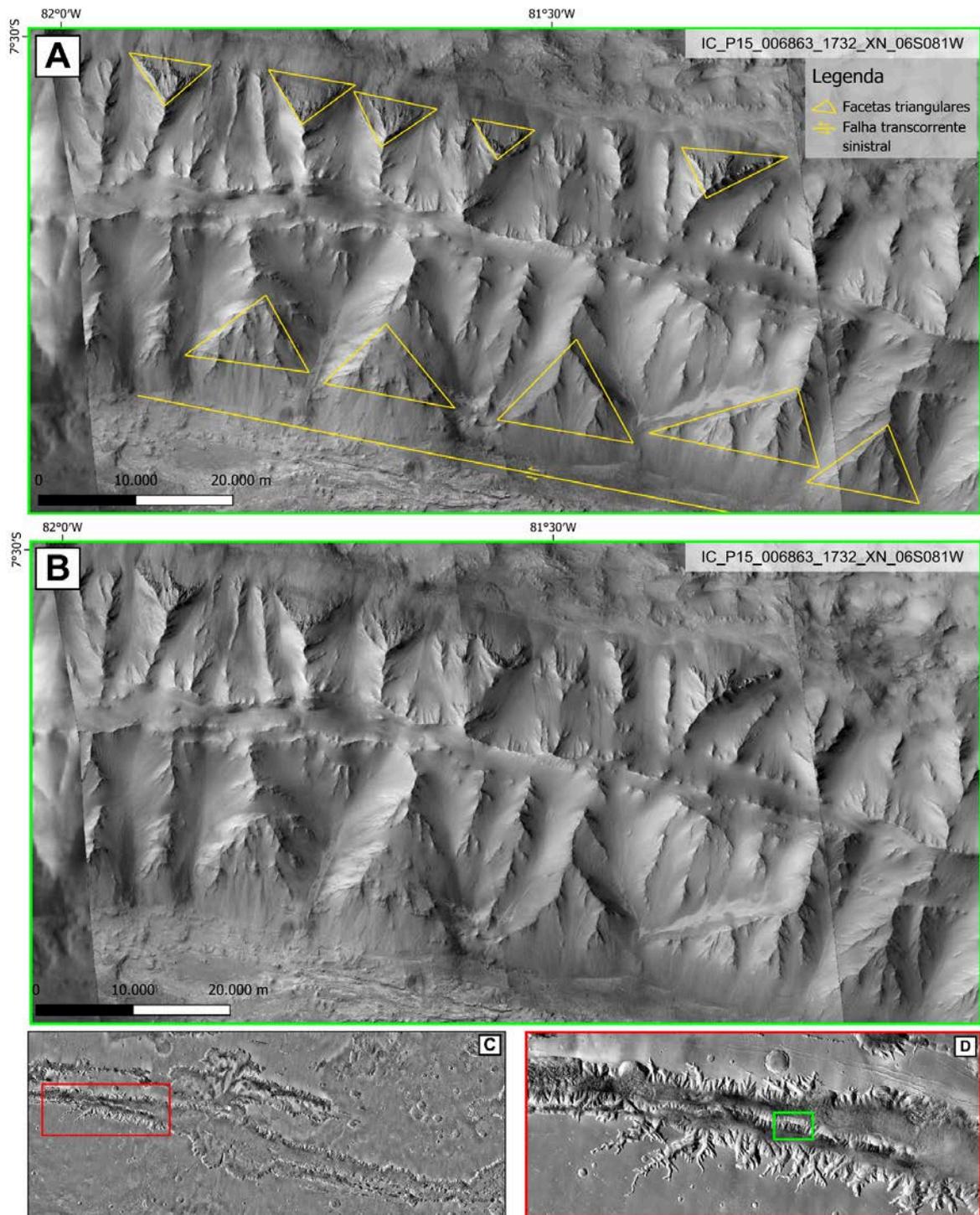


Figura 40: Crista com escarpa e facetas triangulares. **(A)** Interpretação da região, evidenciando as facetas triangulares. **(B)** Imagem não interpretada. **(C)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(D)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

No interior do vale de IC, observam-se falhas escalonadas, assim como aquelas falhas escalonadas de grande porte que seccionam o vale em determinados

trechos, interpretado na figura 39. Porém a Figura 41, que é a uma interpretação da Figura 35, mostra falhas de direção NW com padrão escalonado e deslocamento dextral, junto com a falha principal do VM. É notável que essas falhas escalonadas NW formam lacunas triangulares entre elas e a falha principal, na porção superior do painel A (Figura 41), semelhante às falhas de estante (*bookshelf*) descritas por Cowan et al. (1986) em um regime dextral. Tal geometria também foi identificada no VM por Yin (2012). Outra feição de destaque é a presença de um cume na porção inferior direita do painel A (Figura 41), que pode ser explicado como um cavalgamento gerado pela tensão principal da transcorrência do VM, representado pela elipse conforme modelo de Riedel representado no canto superior direito.

Na Figura 42, observa-se claramente a formação de estruturas de grande porte, como falhas normais de direção NE, que se desenvolvem perpendicularmente à direção do alongamento máximo e da tensão máxima de tração, ou seja, perpendiculares à zona de falha principal (Sylvester, 1988; Burbank e Anderson, 2001). Em OP (Ophir planum), essas falhas normais estão associadas com deslocamentos laterais com a mesma orientação da zona de falha do VM, de direção NW formando um graben, conforme observado pelo modelo de estruturas em uma elipse de deformação para uma zona de deslocamento principal sob regime de cisalhamento simples. No canto superior direito do painel A da figura 42, é possível observar essa elipse rotacionada em relação à falha principal (representada em vermelho na elipse) do VM. Destaca-se o deslocamento para a esquerda das escarpas geradas pelas falhas normais, sugerindo que a transcorrência ocorreu em um período mais recente.

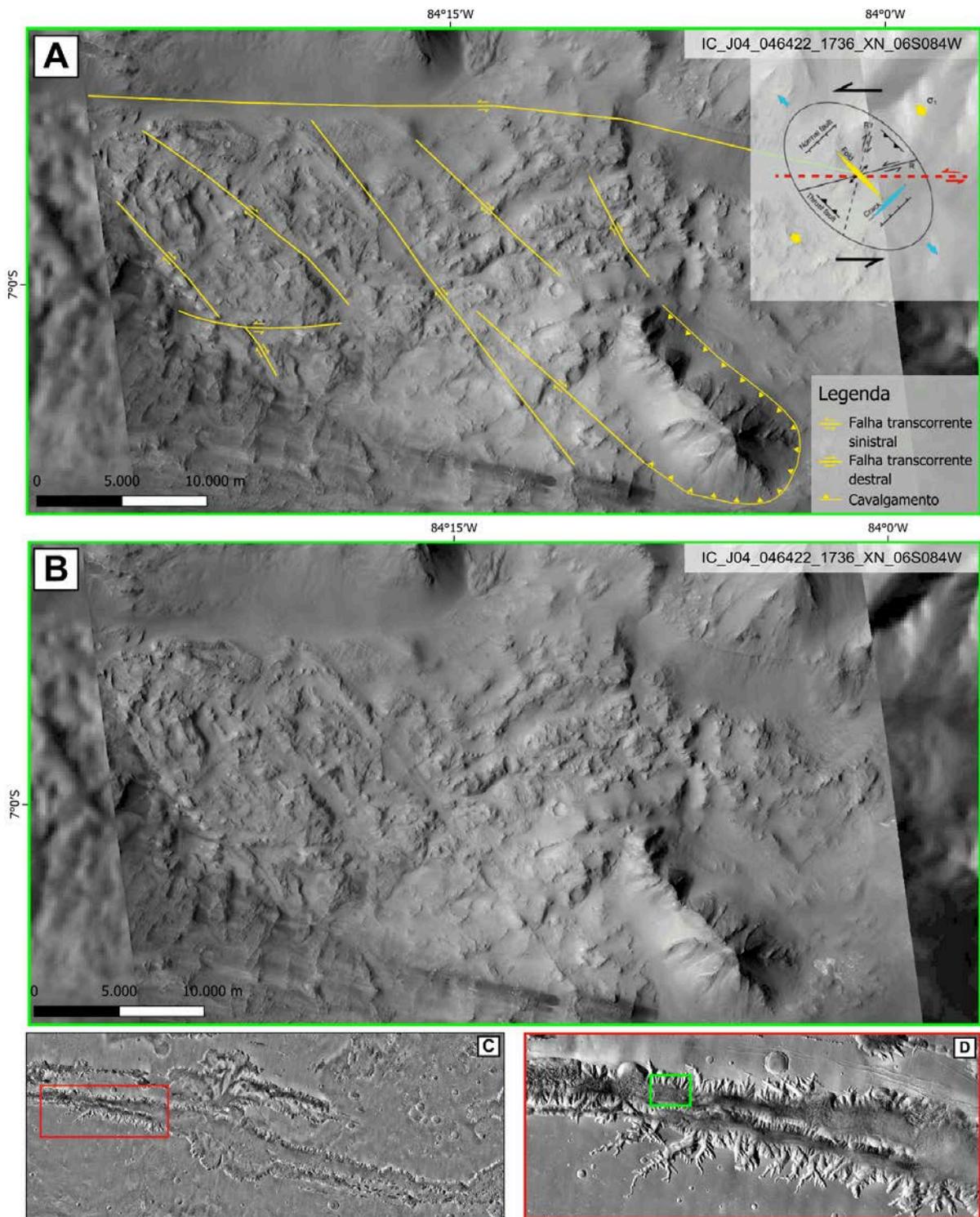


Figura 41: Interior do vale de IC com falhas *bookshelf*. **(A)** Interpretação estrutural com elipse de tensão rotacionado em relação a zona de falha. Fonte da elipse: modificado de Junjie et.al (2021). **(B)** Imagem não interpretada. **(C)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(D)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

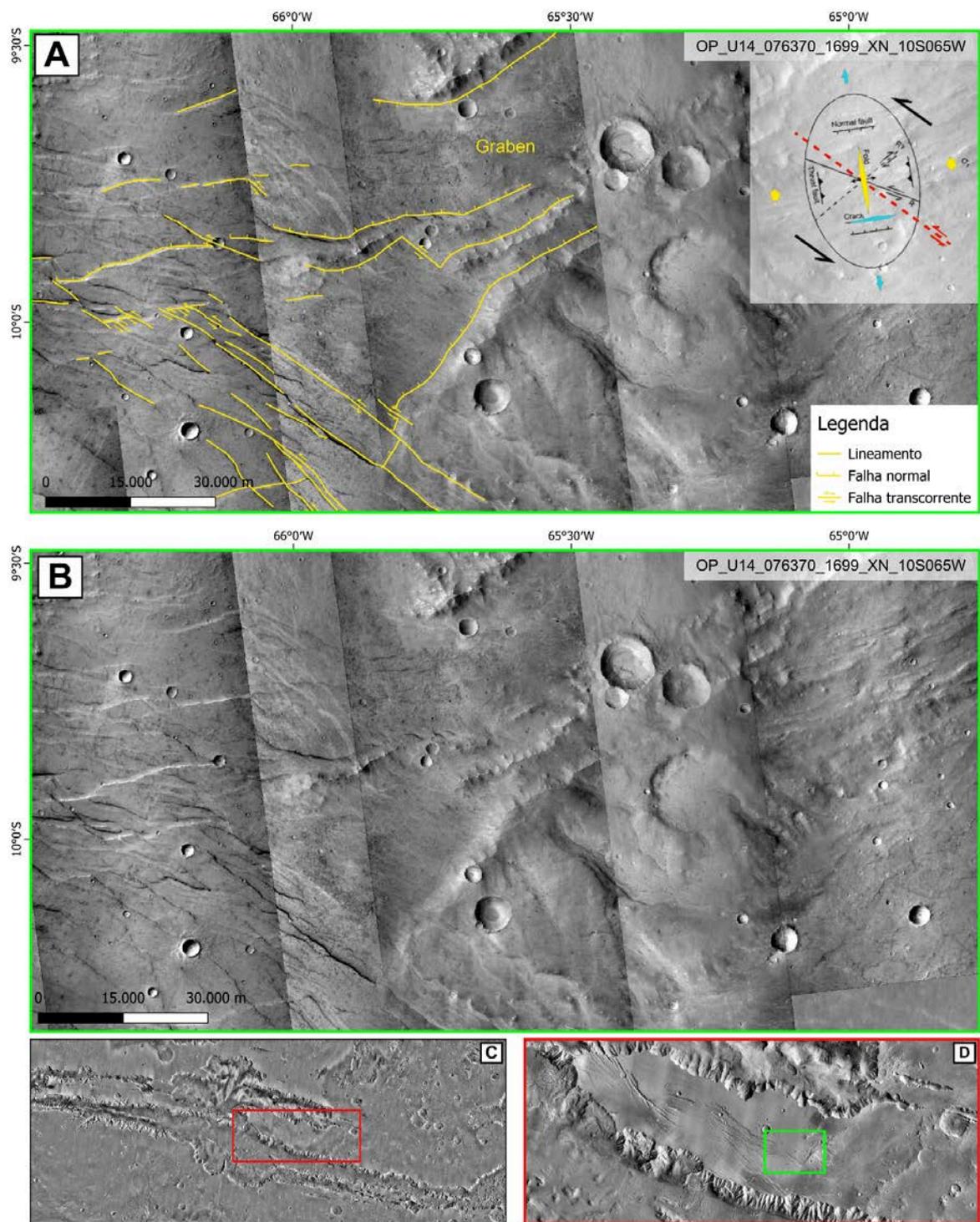


Figura 42: Região em OP com falhas normais e falhas transcorrentes no mesmo padrão de uma elipse de tensão para formação de estruturas de grande escala. **(A)** Interpretação estrutural com elipse de tensão rotacionado em relação a zona de falha. Fonte da elipse: modificado de Junjie et.al (2021). **(B)** Imagem não interpretada. **(C)** Região da imagem dentro do Valles Marineris, retângulo vermelho indica em que região do VM está localizado o quadro C. **(D)** Localização da imagem A, retângulo verde indica onde está localizada a imagem A.

Esse padrão sugere que a deformação não ocorreu exclusivamente dentro do vale, mas também se estendeu aos planaltos adjacentes. Isso é corroborado pela Figura 30, que evidencia deslocamentos laterais de uma crista, além da presença de falhas escalonadas no mesmo planalto (Ophir planum).

Escarpas retilíneas, como as identificadas em Ius e Coprates Chasma por meio da análise geomorfométrica (Figura 10), destacam-se como uma estrutura típica de zonas de falhas transtensionais (Burbank e Anderson, 2001). Além disso, a presença de grandes lineamentos estruturais evidencia o controle tectônico na evolução do sistema de cânions do Valles Marineris.

Deslocamentos laterais são características marcantes no Valles Marineris, especialmente em paleodrenagens e cristas observadas nas planícies altas, como Ophir planum (OP). Na maioria dos casos, as paleodrenagens em OP exibem deslocamentos laterais para a esquerda, consistentes com a provável cinemática da zona de falha do Valles Marineris. A interação entre o deslocamento das paleodrenagens e os componentes normais é uma feição característica de deformações associadas a falhas transtensionais, conforme descrito por Burbank e Anderson (2001).

É possível estabelecer uma comparação entre o Valles Marineris e zonas de falhas transcorrentes na Terra, como por exemplo as falhas de San Andreas, do Mar Morto e Anatólia do Norte, permitindo extrapolações significativas. Estruturas observadas em Marte, como escarpas retilíneas, falhas escalonadas em larga escala, falhas normais e conjugadas e dobras de arrasto, também estão presentes nesses ambientes terrestres.

Na figura 43, temos a comparação do padrão de drenagens encontrado em Marte no VM e um padrão notavelmente semelhante na zona de falha transtensional do Mar Morto ou, também chamada de falha do Rio Jordão (nesse trabalho usaremos como falha do Mar Morto), que limita a borda oeste da placa Arábica e forma uma fenda proeminente, se conecta com o centro do Mar Vermelho e a zona de sutura de Zagros ao norte. Isso pode indicar que a formação do VM pode ser parecida com a formação da falha do Mar Morto, sendo um análogo terrestre proeminente.

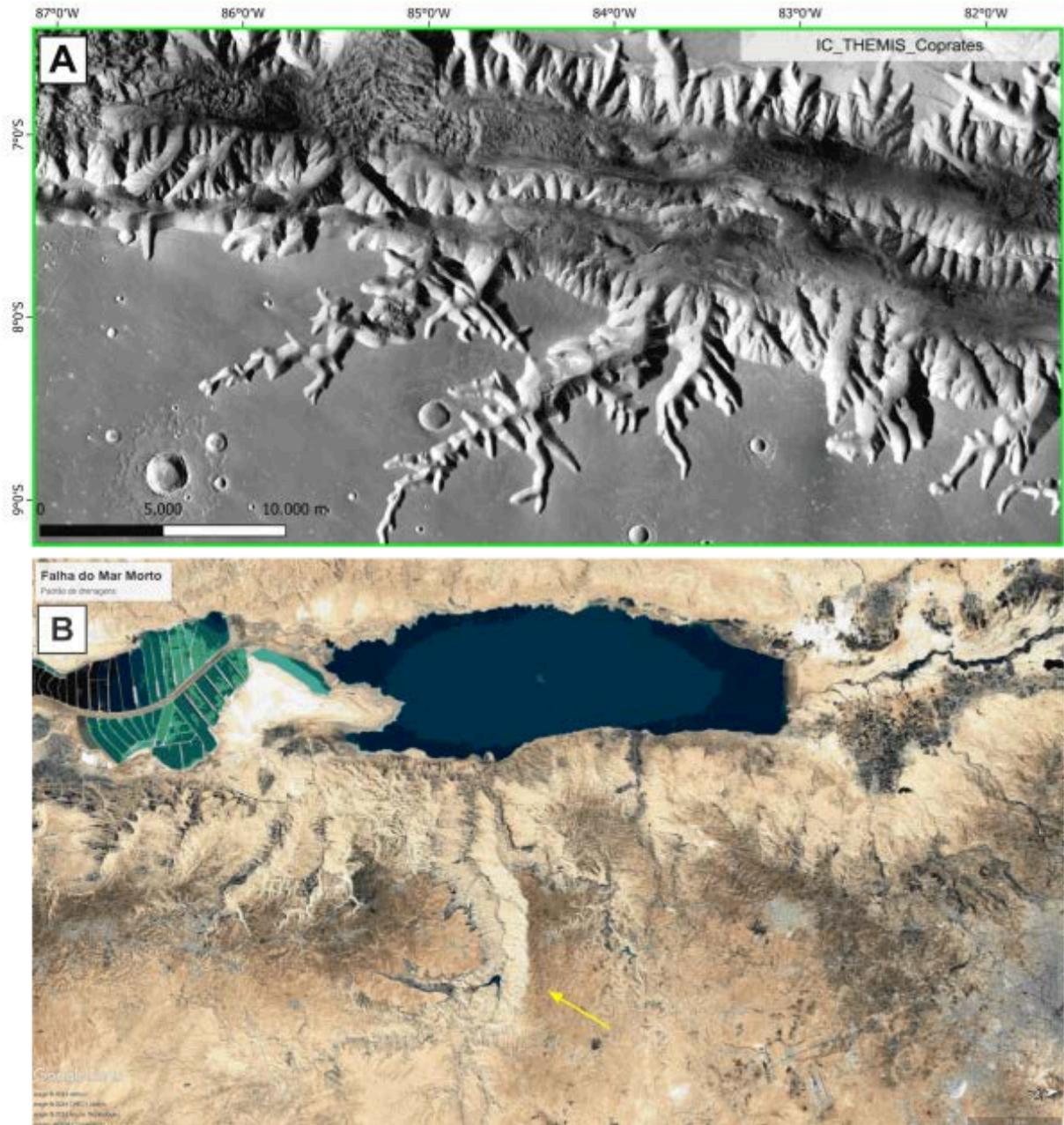


Figura 43: Comparação do padrão de drenagem do VM com a falha do Mar Morto. **(A)** Padrão de drenagens do Valles Marineris. **(B)** Padrão de drenagens da falha do Mar Morto. Fonte: Google Earth.

Na falha da Anatólia do Norte temos duas importantes semelhanças, que se tratam dos lineamentos que atravessam e/ou cortam as cristas (Figura 44), visíveis e interpretadas no VM com padrão escalonado na figura 39. Na falha da Anatólia do Norte esses lineamentos também atravessam as cristas e em alguns locais até deslocam as mesmas. Outra semelhança é a existência de quebras de relevo acentuadas como no mar de Mármara na falha da Anatólia do Norte (Figura 45). Os trabalhos pioneiros consideraram essas feições no VM como sistemas de grabens,

mas quando interpretados dentro de um modelo transcorrente, podem ser explicados como paleo-taludes continentais, semelhantes aos existentes no mar de Mármara. Essa hipótese é sustentada pela existência provável de grandes volumes de água na superfície de Marte em seu passado, sendo o VM um ambiente submerso em sua origem.

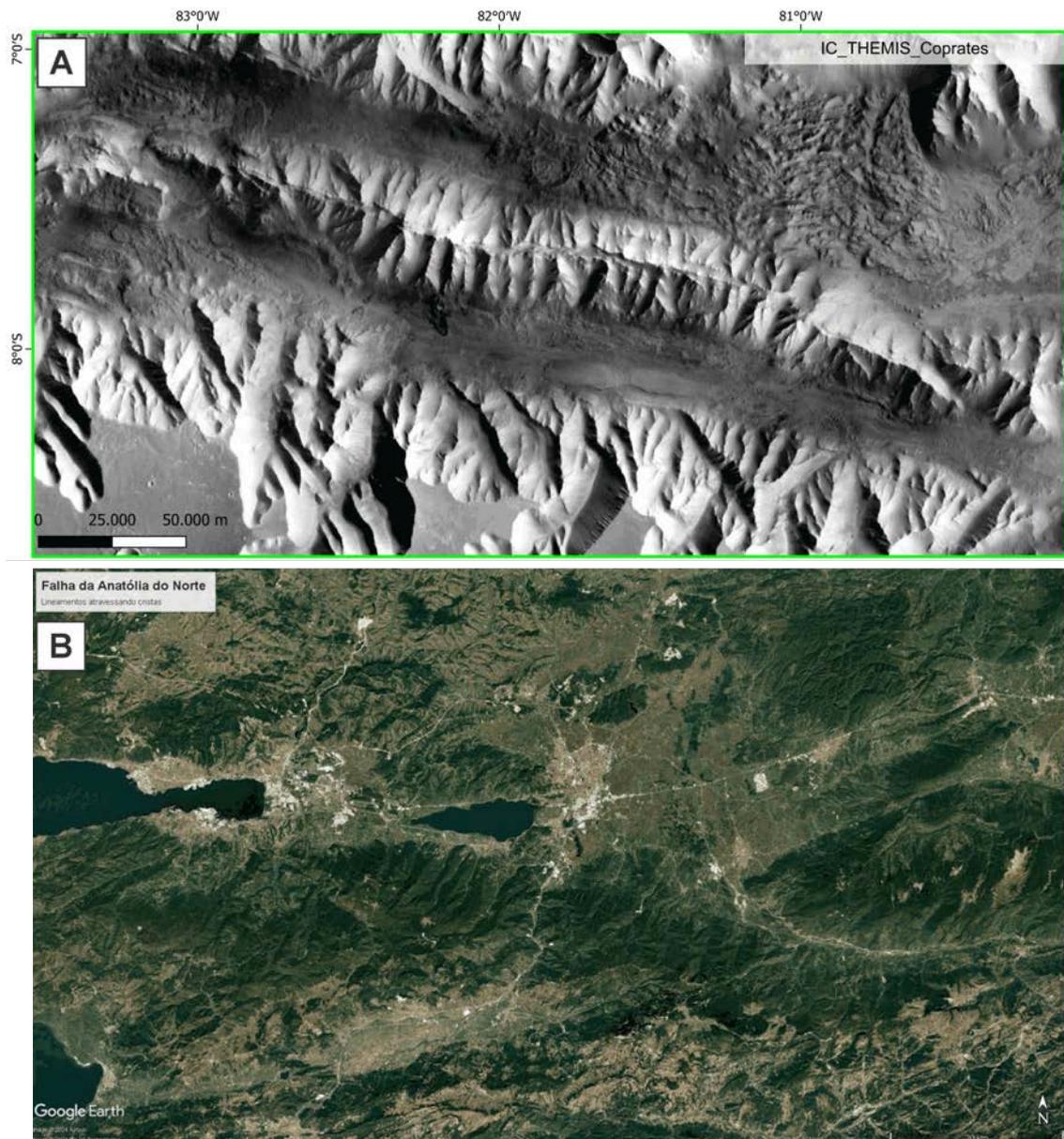


Figura 44: Comparação das falhas cortando a crista em IC no VM com os lineamentos que cortam a crista na falha da Anatólia do Norte. **(A)** Falhas cortando a crista no VM. **(B)** Lineamentos cortando crista na Anatólia do Norte. Fonte: Google earth.

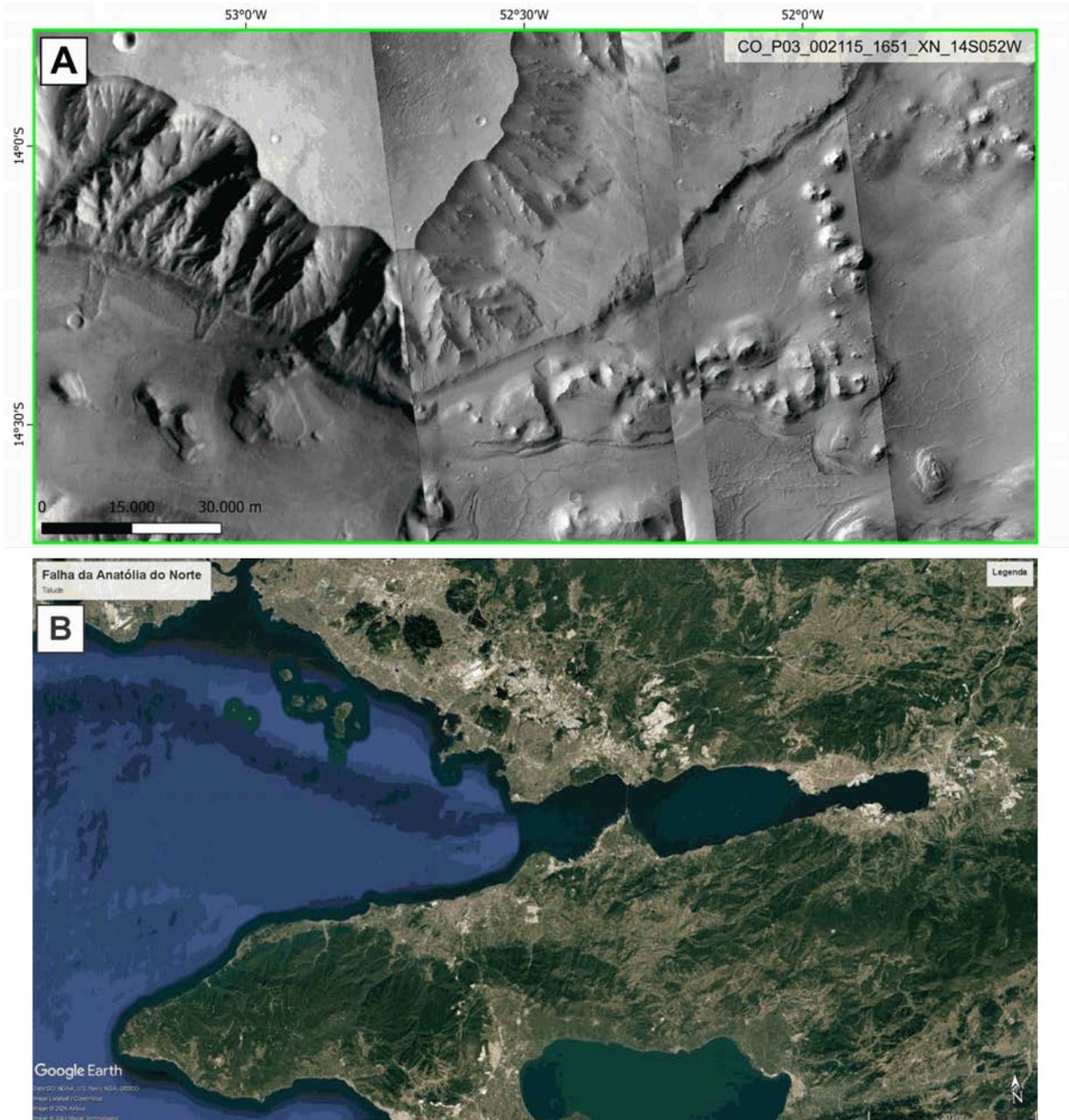


Figura 45: Comparação do talude no VM com o talude do Mar de Marmara na falha da Anatólia do Norte. **(A)** Talude do VM. **(B)** Talude do Mar de Marmara na Anatólia do Norte. Fonte: Google Earth.

Outra semelhança que foi encontrada na zona de falha mais famosa, a falha de San Andreas, são deslocamentos laterais que podem ser encontrados por toda a falha. Na Figura 46, foi destacada uma imagem de deslocamentos laterais de drenagem, e do VM foi utilizado a imagem da figura 31 para comparação, mesmo sendo um deslocamento de crista, pode ser usado para comparação, pois o processo de deformação provavelmente é o mesmo.

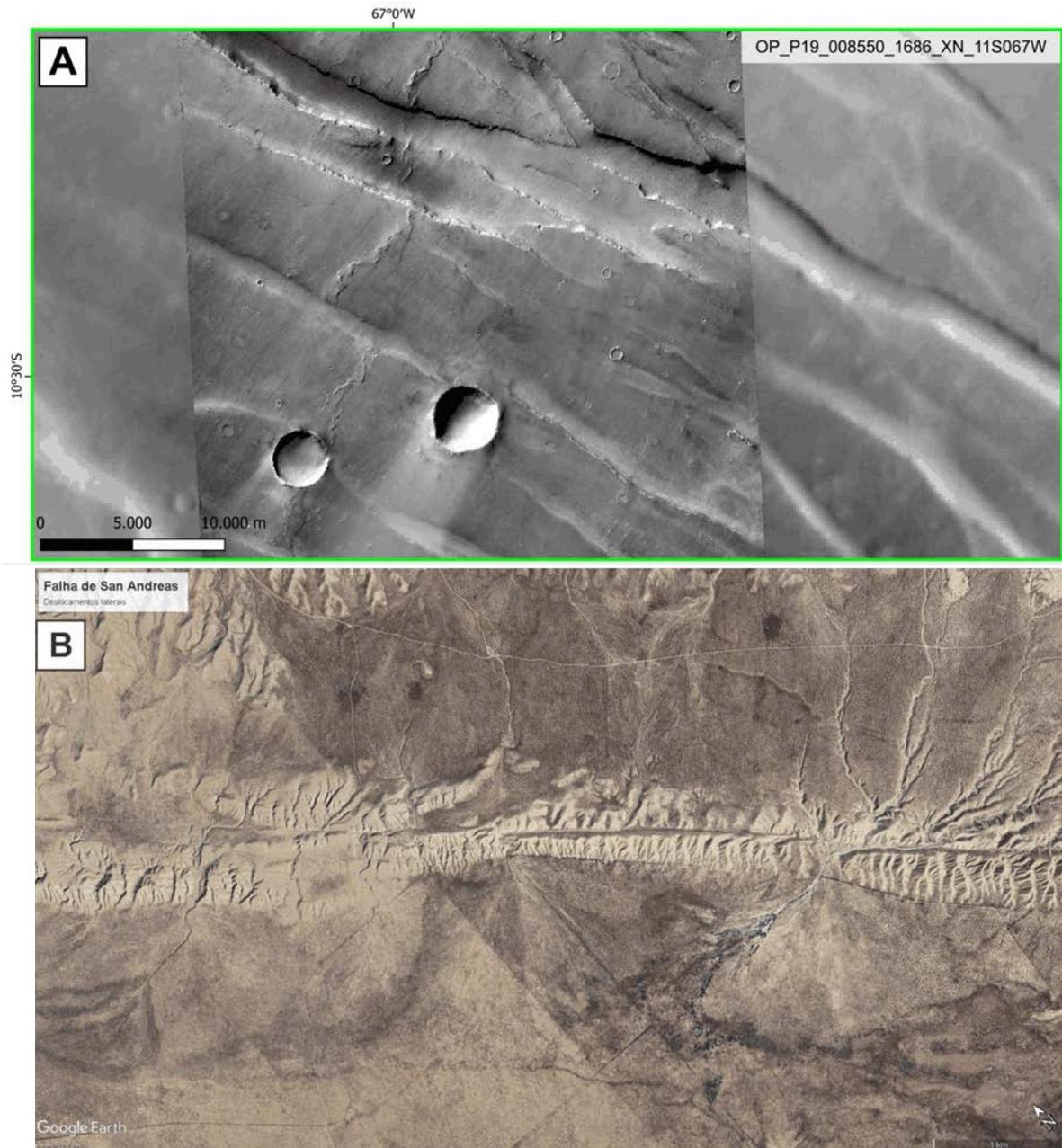


Figura 46: Comparação dos deslocamentos laterais do VM em OP e na falha de San Andreas. **(A)** Deslocamentos laterais em OP no VM. **(B)** Deslocamentos laterais de drenagens na falha de San Andreas. Fonte: Google Earth.

Uma estrutura interessante encontrada no VM, que requer um análogo com a Terra, é a dobra de arrasto localizada em CO (Coprates chasma) associada à escarpa da falha principal do VM. O análogo encontrado na falha de Enriquillo-Plantain Garden no Haiti possui feições similares às descritas na figura 32, onde a movimentação sinistral a falha rotaciona o terreno a norte, formando uma estrutura similar a uma dobra de arrasto (Figura 47).

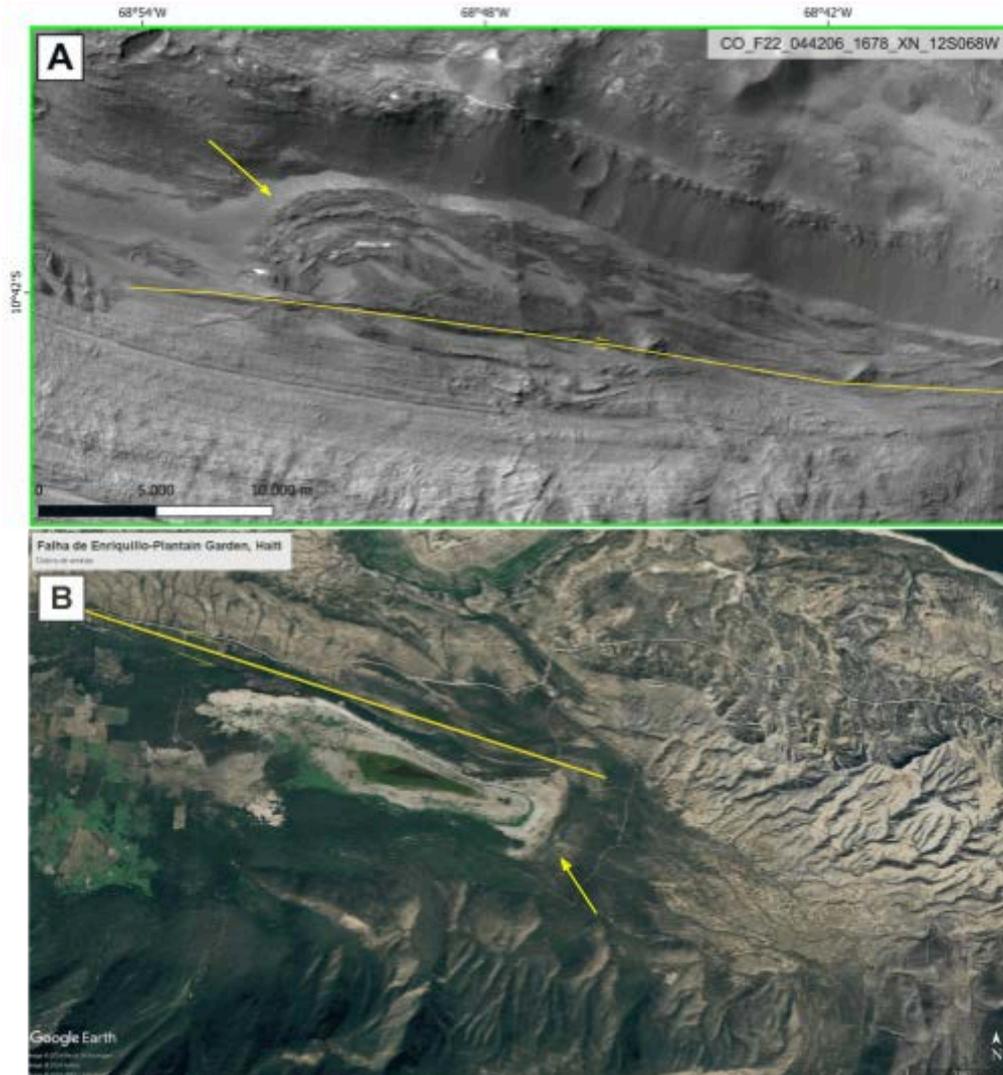


Figura 47: Comparação da dobra de arrasto encontrada em CO no VM com a de Enriquillo-Plantain Garden no Haiti. **(A)** Dobra de arrasto do VM. **(B)** Dobra de arrasto deformando camadas de sedimentos na falha de Enriquillo-Plantain Garden no Haiti. Fonte:Google Earth.

Todas essas deformações indicam um sistema transcorrente, que inclusive contemplam feições de extensão como fraturas arqueadas e grabens, além do aporte sedimentar e sua influência para a formação do VM. Isso revela a complexidade da formação do Valles Marineris e da crosta marciana, podendo haver mais de um evento deformacional, como proposto por Bistacchi et. al. (2004), que poderiam até indicar a presença de microplaca tectônica, evidenciado por orogênias antigas (Anguita et. al, 2001 e 2006).

Porém, as deformações identificadas no Valles Marineris neste trabalho, como deslocamentos laterais, dobras de arrasto, falhas escalonadas, deslocamentos laterais e padrões de drenagens associados a estruturas típicas de um sistema

transcorrente, apresentam notáveis semelhanças com as características de falhas terrestres de grande extensão. Isso se aproxima com a confirmação da hipótese de que o sistema de cânions do Valles Marineris possa ter se formado por dinâmicas internas do planeta e ser interpretado como uma zona de falha transcorrente, mais especificamente transtensional, de proporções planetárias.

Estudos não tão recentes já teorizam que as planícies altas de Syria, Sinai, Solis e Thaumasia seja uma micro placa tectônica e trazendo evidências de orogenias (Anguita et. al., 2001 e 2006). Além de estruturas e tectonismo compressional em Marte já terem sido descritas e analisadas (Watters, 1993).

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como foco a geologia estrutural do Valles Marineris e seu sistema de cânions. Um dos resultados é que o sistema do VM, principalmente o sistema lus-Melas-Coprates experienciaram deformações transcorrentes e extensão perpendicular, configurando em um sistema de transtensão, corroborando com a hipótese de Yin (2012). Isso porque as morfoestruturas internas apresentam diversas feições típicas de ambientes transcorrentes, como falhas escalonadas, dobras de arrasto, vales alongados, feições lineares rompidas com rejeito direcional (Burbank e Anderson, 2001), falhas conjugadas em disposição R e Y segundo o modelo de Riedel (Wilcox et. al., 1973) e falhas tipo *bookshelf* (Cowan et. al., 1986).

Algumas dessas morfoestruturas foram identificadas por meio do atributo geomorfométrico de perfil de curvatura, que destacou escarpas e lineamentos retilíneos onde as paleodrenagens estão encaixadas. Além disso, foram evidenciados lineamentos que seccionam as cristas, revelando um padrão escalonado conforme o modelo de Riedel (Wilcox, 1973). Os padrões de drenagem gerados pelo atributo de área de contribuição apresentaram configurações já reconhecidas na Terra, como o padrão de treliça, que indicam a presença de falhas transcorrentes, contribuindo para a interpretação de um regime transcorrente no VM.

As estruturas reveladas e discutidas ao longo do trabalho, especialmente as escarpas retilíneas, que se destacam em todo o VM e as facetas triangulares nas cristas, as falhas escalonadas de grande escala associadas ao modelo de Riedel, onde em determinadas regiões ocorre o deslocamento da crista. Outras estruturas relevantes incluem os deslocamentos laterais nas altas planícies, como os observados em Ophir Planum, a dobra de arrasto em CO. Essas estruturas principais são características de ambiente transcorrente e com base nos indicadores cinemáticos de deslocamentos e dobra de arrasto, sugerem uma cinemática sinistral para o VM, o que aproxima para a hipótese do trabalho, de que o VM foi formado por uma dinâmica interna do planeta gerando a transcorrência.

Todas essas morfoestruturas observadas no VM possuem estruturas análogas na Terra, principalmente na zona de falha do Mar Morto, Falha de San Andreas, zona de falha da Anatólia do Norte. Dentre todas as falhas da Terra, inferimos que a zona de falha da Mar Morto possua a maior semelhança, sendo uma

falha transtensional com a formação de uma bacia *pull-apart*. Isso implica que a dinâmica da crosta marciana tenha possuído uma complexidade maior do que o considerado por estudos pioneiros, como Bistacchi (2004) que propôs três eventos deformacionais para o Valles Marineris e sua extensão até o Noctis Labyrinthus, já propondo a transtensão como uma das fases de deformação do sistema.

Dada a complexidade da formação do VM e da crosta marciana, esse trabalho abre espaço para estudos futuros, com a possibilidade de estar utilizando a geofísica para mapeamento de estruturas, procurando detalhar melhor o VM e toda a região ao seu redor, corroborando para teoria de transcorrência. Além disso, é necessário encontrar a provável tensão e definir se os eventos tectônicos e as estruturas estão mais para distensivos do que para compressivos, definindo ou não um regime de transtensão.

REFERÊNCIAS

- Anguita, F., Farelo, A-F., López, V., Mas, C., Espadas-Muñoz, M-J., Márquez, A. e Ruiz, J. 2001. ***Tharsis dome, Mars: New evidence for Noachian-Hesperian thick-skin and Amazonian thin-skin tectonics***. Journal of Geophysical Research, v. 106, n° E4, p. 7577-7589.
- Anguita, F., Fernández, C., Cordero, G., Carrasquilla, S., Anguita, J., Núñez, A., Rodríguez, S. e García, J. 2006. ***Evidences for a Noachian-Hesperian orogeny in Mar***. Icarus, v. 185, p. 331-357, doi:10.1016/j.icarus.2006.07.026
- Bistacchi, N., Massironi, M. e Baggio, P. 2004. ***Large-scale fault kinematic analysis in Noctis Labyrinthus (Mars)***. Planetary and Space Science, v. 52, p. 215-222, doi:10.1016/j.pss.2003.08.015
- Burbank, D. W., Anderson, R. S. 2001. ***Tectonic Geomorphology***. Blackwell Science, Oxford, UK, 274p.
- Christofoletti, A. 1980. ***Geomorfologia***. Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, p.103-127
- Cowan, D. S., Botros, M. e Johnson, H. P. 1986. ***Bookshelf Tectonics: Rotated crustal blocks within the Sovanco Fracture Zone***. Geophysical Research Letters, v. 13, n° 10, p. 995-998. doi:10.1029/GL013i010p00995
- Freund, R. 1970. ***Rotation of strike slip faults in Sistan, southeast Iran***. Journal of Geology, v. 78, p. 188-200.
- Frey, H., 1979, ***Martian canyons and African rifts: Structural comparisons and implications***. Icarus, v. 37, p. 142–155, doi:10.1016/0019-1035(79)90122-2.
- Fossen, H. 2012. ***Geologia Estrutural***. Oficina de Textos, São Paulo, p.447-464.
- Ren, J., Zhang, Z., Gai, H. e Kang, W. 2021. ***Typical Riedel shear structures of the coseismic surface rupture zone produced by the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake, Qinghai, China, and the implications for seismic hazards in the block interior***. Natural Hazards Research, v. 1, p. 145-152. doi: 10.1016/j.nhres.2021.10.001.
- Peulvast, J.P.; Masson, Ph.L., 1993. ***Erosion and tectonics in Central Valles Marineris Mars : a new morphostructural model***. Earth, Moon, Planets, v. 61, p. 191–217.

Peulvast, J.P.; Mège, D., Chiciak, J.; Costard, F.; Masson, P.L., 2001, ***Morphology, evolution and tectonics of Valles Marineris wall slopes (Mars)***. *Geomorphology*, v. 37, p. 329–352, doi:10.1016/S0169-555X(00)00085-4.

Schultz, R.A. 1991, ***Structural development of Coprates Chasma and western Ophir Planum, Central Valles Marineris rift, Mars***. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 22,777- 22,792, doi:10.1029/91JE02556.

Silveira, R. M. P. 2019, ***Proposta metodológica para mapeamento geomorfológico com uso da análise digital do relevo no estado do paraná***. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, 216p.

Tarboton, D. G. 1997, ***A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models***. *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.

Watters, T. R. 1993, ***Compressional Tectonism on Mars***. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 98, No. E9, p. 17,049-17,060. doi:10.1029/93JE01138

Wilcox, R. E., Harding, T. P. 1973, ***Basic Wrench Tectonics***. *AAPG Bulletin*, v. 57, p.74-96. doi:10.1306/819a424a-16c5-11d7-8645000102c1865d.

Yin. A. 2012, ***Structural analysis of the Valles Marineris fault zone: Possible evidence for large-scale strike-slip faulting on Mars***. *Lithosphere*, v. 4 (n. 4), p. 286-330. doi:10.1130/L192.1

Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. 1987, ***Quantitative analysis of land surface topography***. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47–56.