

ANÁLISE DE PARÂMETROS LINEARES DA MORFOLOGIA DAS DUNAS DA CRATERA HERSCHEL MARTE ATRAVÉS DAS IMAGENS HIRISE

Diego Dal Pozzolo Dos Santos¹
Bernardo Sayão Penna e Souza²

Resumo: Este trabalho realizou uma análise da atividade eólica na cratera Herschel, Marte, a partir de dois campos de dunas com diferentes condições topográficas. No campo Leste entre pequenas crateras simples, e no Oeste o campo de dunas localizado dentro de uma grande cratera de impacto, próximo ao pico central soerguido. Como fontes de dados foram empregadas imagens (resolução espacial de 0,25m) e modelos digitais de terreno (DTM) com resolução espacial de 1m/pixel, gerados pelo sensor HIRISE da sonda orbital Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Foram medidos parâmetros horizontais (Área, azimute, comprimento, largura e a relação comprimento/largura), e parâmetros verticais (altura da crista (HC), altura da face de escorregamento (HS), declividade da face de escorregamento, curvatura) de 10 dunas em cada campo. No Campo Herschel Leste, caracteriza-se pelo regime de ventos unimodal. Apresentam barcanas gordas e livres em active. A evolução é para barcanóides axiais, com a presença de dunas transversais. Consiste de uma megabarcana interrompida por cratera de impacto de 947m de diâmetro. Destaca-se como fenômeno a sombra de vento gerada pela cratera de impacto principal. As dunas possuem pouca variação de azimute. Ocorrem Ripple marks na região interduna influenciados pelo vento noturno e topografia. Condições similares foram identificadas em ambientes análogos terrestres como White Sands, (Novo México), Wolfe Creek, (Austrália) e a Lagoa da Conceição (Santa Catarina). No Campo Herschel Oeste bimodal agudo. Apresenta dunas normais e delgadas em declive, algumas ancoradas em Yardangs, com muita variação de azimute. Como análogo terrestre, temos o Oasis de Liwa (Emirados Árabes Unidos /Arábia Saudita).
Palavras-chave: Geomorfologia Planetária. Marte. Dunas. Crateras

ANALYSIS OF LINEAR PARAMETERS OF MORPHOLOGY OF THE DUNES OF THE HERSCHEL CRATERA ON MARS THROUGH HIRISE IMAGES

Abstract: This paper performs an analysis of aeolian activity on Herschel crater on Mars from two dune fields in different topographical settings. At East field, between small simple craters, and at West the dune field is located inside a large impact crater, near to uplifted central peak. As source of data will be employed high resolution images (spatial resolution 0.25 m/pixel) and digital terrain models (DTM), with 1m / pixel spatial resolution, generated by HiRISE sensor of orbital probe Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Were measured horizontal parameters (Area, Azimuth length, width, and length/width ratio) and vertical parameters (height of crest (HC), height of slipface (HS), slipface slope, curvature) of 10 dunes in each field. In Field Herschel East, it is characterized by the unimodal wind regime. They have fat and free barchans on the uphill. The evolution is for axial barchanoids, with

1 Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil, psdiego@hotmail.com.br, <https://orcid.org/0009-0008-4407-6775>

2 Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Departamento de Geociências, Santa Maria, RS, Brasil, bernardosps@yahoo.com.br, <https://orcid.org/0000-0002-4896-4226>

the presence of transverse dunes. It consists of a megabarchan interrupted by an impact crater 947m in diameter. The wind shadow generated by the main impact crater stands out as a phenomenon. The dunes have little azimuth variation. Ripple marks occur in the interdune region influenced by night wind and topography. Similar conditions were identified in similar terrestrial environments such as White Sands (New Mexico), Wolfe Creek (Australia) and Lagoa da Conceição (Santa Catarina). In Herschel Field West Acute Bimodal. They present normal and thin sloping downhill dunes, some anchored in Yardangs, with lots of azimuth variation. As a terrestrial analogue, we have the Liwa Oasis (United Arab Emirates / Saudi Arabia)

Keywords: Planetary Geomorphology. Mars. Dunes. Craters

ANÁLISIS DE PARÁMETROS LINEALES DE MORFOLOGÍA DE LAS DUNAS DEL HERSCHEL CRATERA, MARTE A TRAVÉS DE IMÁGENES DE HIRISE

Resumen: Resumen: En este trabajo se realizó un análisis de la actividad del viento en el cráter Herschel, a partir de dos campos de dunas con diferentes condiciones topográficas. En el campo este entre pequeños cráteres simples, y en el oeste, el campo de dunas ubicado dentro de un gran cráter de impacto, cerca del pico central, se elevó. Como fuentes de datos se utilizaron imágenes (resolución espacial de 0,25 m) y modelos digitales del terreno (DTM) con resolución espacial de 1 m / píxel, generados por el sensor HIRISE de la sonda Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Se midieron los parámetros horizontales (Área, acimut, largo, ancho y la relación largo / ancho) y los parámetros verticales (altura de la cresta (HC), altura de la cara de deslizamiento (HS), pendiente de la cara del talud, curvatura) de 10 dunas en cada campo. En Campo Herschel Leste, se caracteriza por el régimen de viento unimodal. Tienen barchanes gordas y libres en la pendiente. La evolución es por barcanoides axiales, con presencia de dunas transversales. Consiste en un megabarchan interrumpido por un cráter de impacto de 947m de diámetro. Destaca como fenómeno la sombra de viento generada por el cráter de impacto principal. Las dunas tienen poca variación de acimut. Las marcas onduladas ocurren en la región interduna influenciada por el viento nocturno y la topografía. Se identificaron condiciones similares en ambientes terrestres análogos como White Sands (Nuevo México), Wolfe Creek (Australia) y Lagoa da Conceição (Santa Catarina). En Herschel Field Acute Bimodal West. Presenta dunas cuesta abajo normales y delgadas, algunas ancladas en Yardangs, con mucha variación de acimut. Como análogo terrestre tenemos el Oasis de Liwa (Emiratos Árabes Unidos/Arabia Saudita).

Palabras clave: Geomorfología Planetaria. Marte. Dunas. Cráteres

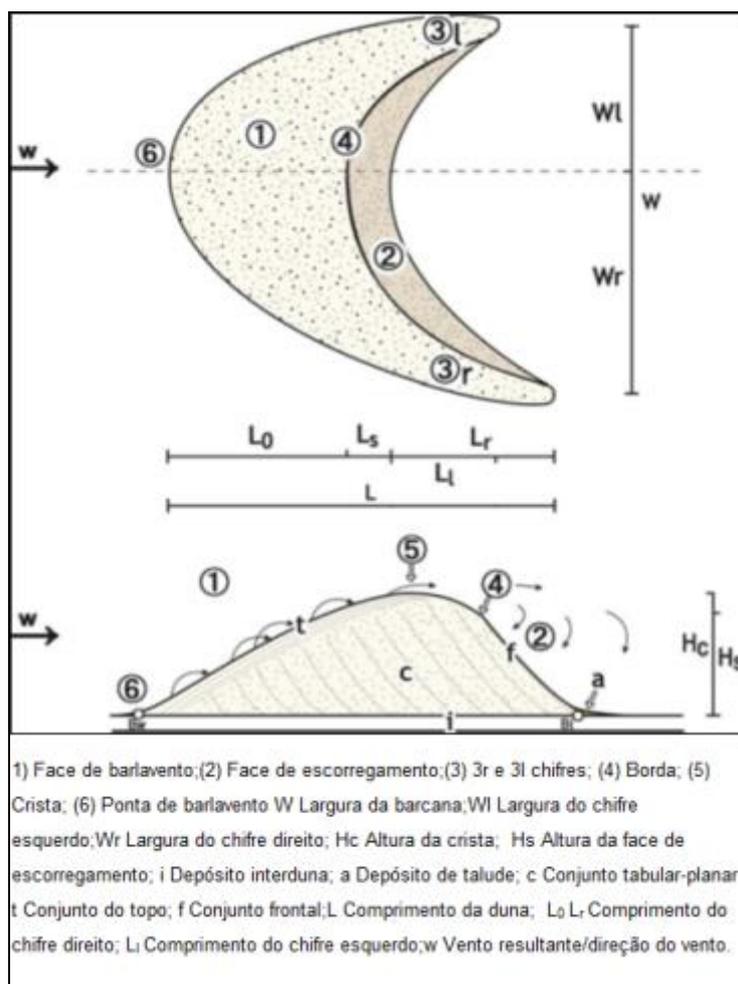
Introdução

O estudo do Sistema Solar mostrou que os conceitos da Geomorfologia, Geologia, e Climatologia não se restringem a Terra, sendo importante ferramenta de comparação, análise, e predição, levando os cientistas adotar uma perspectiva nova, interplanetária, para os fenômenos que também são observados na superfície terrestre. De acordo com Mendonça (1997) "Esta conquista espacial e os seus reflexos sobre a sociedade configura-se certamente um novo paradigma científico,

quase restrito na atualidade ao domínio das ciências físicas e naturais, porém de forte conotação geográfica”. Para Baker & Twindale (1991), a Geomorfologia mais intelectualmente estimulante é quando ocorre uma íntima associação entre os fatos e os fenômenos. Essa associação entre fatos e os fenômenos é facilitada sem as amarras como modismos ou agendas, sendo mais focada na descoberta de novos fenômenos e no desenvolvimento de explicações. Estas pesquisas rompem com certas posturas intelectuais estanques e estimulou a criatividade, a reflexão, a descoberta por acaso, a espontaneidade, a satisfação intelectual e o bom senso dentro da pesquisa científica. Há também uma significativa valorização de estudos de fenômenos raros e anômalos e nas condições particulares que levaram a sua formação.

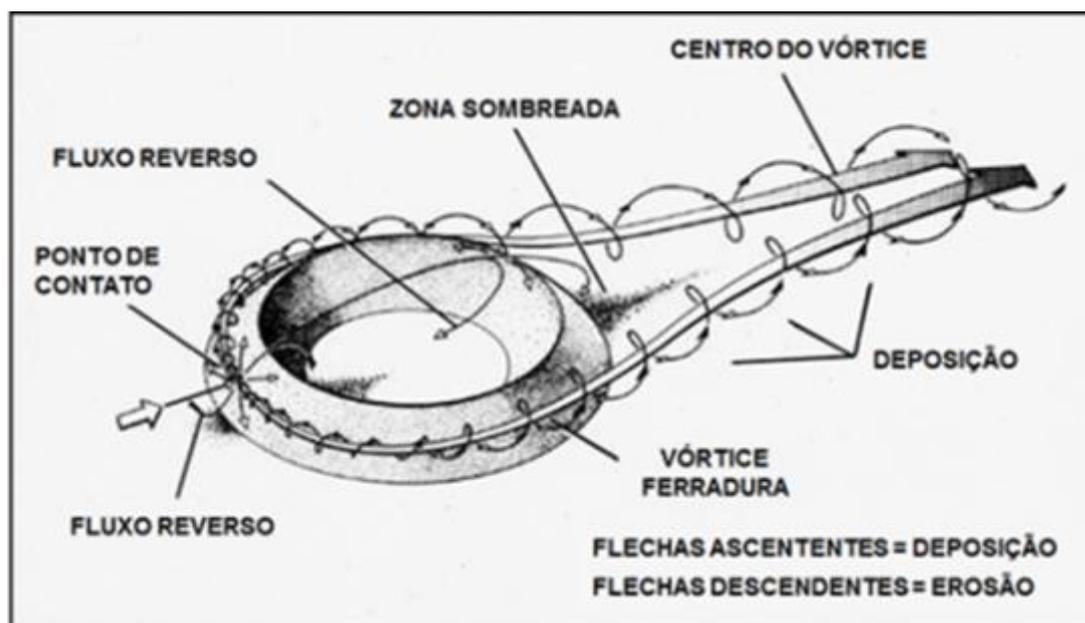
O conceito de duna é apresentado por Cardinale et al (2015) “Uma duna é uma forma de relevo eólica ou subaquática criada pelo movimento de grãos de tamanho areia”. Dunas barcanas são dunas em forma de lua crescente e com apenas uma única face de escorregamento. A palavra Barcana é originada do Turcomano Barkhan “colina que se move”. O termo foi introduzido na literatura científica pelo autor russo Alexander von Middendorf em 1881. A Figura 1 traz parâmetros morfológicos, e morfométricos das dunas barcanas.

Figura 1 – Parâmetros morfológicos e morfométricos das dunas barcanas.



Fonte Adaptação de Hargitai (2014)

Conforme Melosh (2011), as paisagens dominadas pelo vento recebem especial atenção dos geomorfólogos por sua relativa raridade, sendo notavelmente diferente do que é comum em nosso planeta por sua instabilidade. São estes fatores que justificam as dunas como tema de pesquisa deste trabalho. As dunas estão constantemente movendo-se em um movimento lento, alterando suas formas. A interação entre o vento e a topografia das crateras de impacto segundo Melosh (2011), gera um padrão específico de zonas de erosão e deposição. As bordas externas das crateras geram turbulência de vórtices na forma de ferradura, (similar aos contrails nas pontas das asas dos aviões) erodindo as bordas da cratera e gerando uma “zona de sombra” em forma de gota entre os dois vórtices, aonde ocorrem os processos de deposição, devido a uma reversão da direção do vento no interior da cratera, como está exemplificado pela Figura 2. Ocorre também a formação de raias (streaks) que podem ser de material claro, rico em sílica/sais ou escuro (minerais máficos).

Figura 2 – Interação do vento com a topografia na borda das crateras

Fonte: Adaptação de Greeley & Iversen (1985)

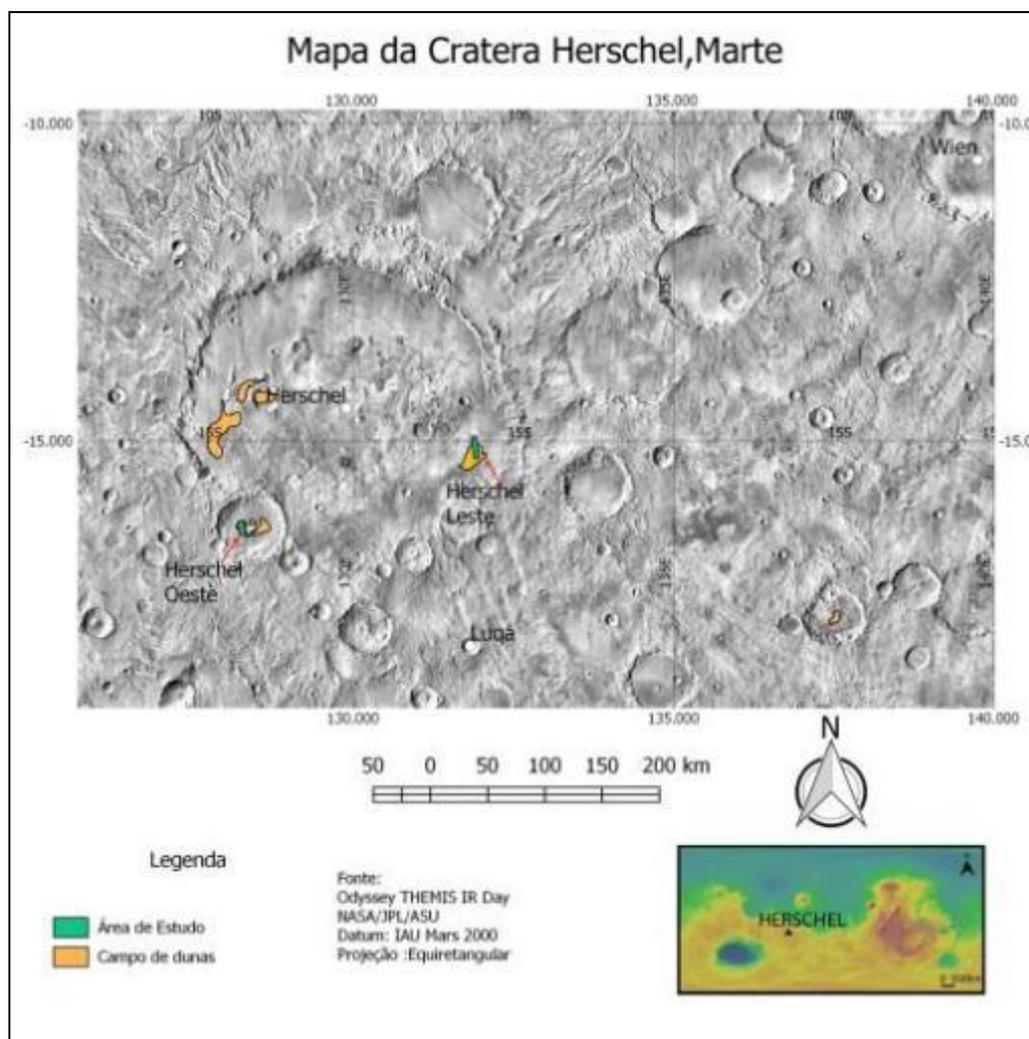
Caracterização da área de estudo

Conforme Hargitai (2015) padrões de dunas em escala regional, tanto na Terra quanto em Marte a partir da década de 1970, são características facilmente distinguíveis visualmente na fotointerpretação. Entretanto esses padrões podem representar condições específicas de formação. Os padrões simples mostram uma variedade muito maior. Essa categorização visual também pode resultar em dificuldades em classificação como, por exemplo, vários padrões não classificados de morfologias de transição ou incomuns. Hoje métodos quantitativos de classificação são geralmente preferíveis aos qualitativos. A quantificação dos padrões de campos de dunas normalmente está acoplada com modelagens numéricas e incluem métodos similares a análise de bacias de drenagem: quantificação da densidade de dunas, espaçamento, orientação, terminação, junção, comprimento, altura e análise do vizinho mais próximo.

Uma série de feições eólicas ocorre no interior da cratera *Herschel*, localizada em 15.1°S, 131.9°E, na região de *Mare Tyrrenum* (Quadrante MC-22) uma bacia de impacto degradada, de quase 300 km, de idade noachiana (>3,6 bilhões de anos). Conforme Runyon et al (2014), o que distingue a área da cratera *Herschel* são a sua relativa proximidade (cerca de 700 km SW) da cratera Gale, o local de pouso da sonda MSL (*Mars Science Laboratory*) *Curiosity*, (com a qual apresenta similaridades), os seus padrões complexos de texturas dos *ripple marks*, e a grande diversidade geomorfológica da área, com a presença de barcanas, barcanóides,

lençóis e cadeias transversais endurecidas (ITARS *Indurated Transverse Aeolian Ridges*), localizados geralmente mais próximos das bordas da bacia de *Herschel*. Foram identificados pelo levantamento MGD3 (*Mars Global Digital Dune Database*), elaborado por Hayward et al (2007), campos de dunas nos setores oeste e central da cratera *Herschel*, porém apenas no pólo sul (MC-30) foram utilizadas imagens de resolução espacial intermediária (<100m/pixel). Na Figura 3 pode-se ver a cratera *Herschel* na imagem em infravermelho diurno do sensor *Themis* da sonda *Mars Odyssey*, Mosaico Global na resolução espacial de 100 m/pixel.

Figura 3 – Cratera *Herschel* (Leste e Oeste), Marte.



Fonte: Os autores

Material e Método

Como estado da arte da observação planetária temos a sonda MRO, que foi lançada em 12 de agosto de 2005, entrou em órbita de Marte em 10 de março de 2006 e iniciou sua missão em 17 de novembro de 2006. É considerada a mais

avançada sonda orbital lançada pela NASA e é capaz de examinar a superfície marciana com a maior resolução espacial disponível através da câmera HIRISE. Descreve uma órbita polar de 255 x 320 km, tendo sua periapse (ponto mais baixo da órbita) sobre o pólo sul marciano e o apoápice (ponto mais alto da órbita) sobre o pólo norte, sobrevoando o equador marciano. Conforme os parâmetros técnicos ópticos detalhados por McEwen et al (2007) a HIRISE está equipada com um telescópio cujo espelho primário de 50 cm e distância focal de 12 m, o que produz um IFOV (Instantaneous Field of View - Campo de Visada Instantâneo) de 1 microradiano resultando em uma resolução espacial de até 25 cm/pixel, capaz de imagear uma faixa de 6 km na banda do vermelho e de 1,2 km nas composições coloridas das outras bandas.

Para a medição dos parâmetros lineares como, por exemplo, a relação entre a Largura/Comprimento no campo leste de Herschel os dados utilizados foram as imagens ORTHO. A retificação Ortografia (remoção da paralaxe) minimiza as distorções na imagem devido à topografia.

Um DTM não é propriamente uma imagem, mas um produto raster que registra valores de elevação de um dado terreno em cada pixel. Os metadados correspondentes incluem informações de projeção do mapa, assim os pixels podem ser associados com latitude e longitude. Os modelos digitais de terreno (DTM) são produtos derivados de pares de imagens Ortografadas (ORTHO), obtidas de um mesmo local, porém com ângulos de visada ligeiramente diferentes. Serão empregados na elaboração dos mapas de Altimetria, declividades e orientação de vertentes na resolução de 1m/pixel (escala de 1:50.000).

O CTX, outro instrumento embarcado na MRO, descrito por Malin et al (2007), tem como objetivo a) fornecer imagem de contexto para outros instrumentos da MRO como a HIRISE, b) observar feições de interesse do Mars Exploration Program da NASA como possíveis locais de pouso, c) conduzir investigações científicas de processos geológicos, geomorfológicos e meteorológicos em Marte. Com a resolução espacial de 5 m/pixel e cobertura de 30 x 30 km, a imagem pancromática foi empregada neste trabalho como contexto para o campo Herschel Leste e para a delimitação do campo de dunas do leste de Herschel.

O sensor THEMIS, descrito por Parker (2004), carregado pela sonda Mars Odyssey é um imageador multiespectral de alta resolução espacial e espectral capaz de produzir imagens em comprimentos de luz visível, de infravermelho próximo e de infravermelho termal. Para o subsistema de infravermelho termal o

sensor possui 9 bandas entre 6,5 e 14,5 μm de comprimento, com resolução espacial de 100 m. Os parâmetros orbitais foram apresentados por Saunders et al (2004). Foi lançada em 7 de abril de 2001 e entrou na órbita de Marte em 24 Outubro de 2001. Iniciou sua missão em 30 de Janeiro de 2002. A sonda orbita Marte na altitude de 400 x 400 km, em uma órbita polar de 2h de duração. É atualmente a missão mais antiga em órbita de Marte, servindo como link de comunicações entre a Terra e os rovers na superfície marciana. Neste trabalho será empregada a imagem termal diurna (IR DAY) como mapa-base de contexto da cratera Herschel.

Todos estes dados apresentam a projeção Equiretangular e o sistema de coordenadas (Datum) Mars_IAU_2000. Seidelmann et al (2002), relembra que o Mars_IAU_2000 define Marte como uma elipse com 3.396.190 m equatorial e um raio polar de 3.376.200 m. A latitude é definido em relação ao centro de Marte (planetocêntrico). Sistemas de coordenadas terrestres, no entanto (por exemplo, WGS84) comumente definem a latitude em relação à superfície (planetográfico).

Sua distribuição é feita pelo PDS *Geosciences Node Mars Orbital Data Explorer* (ODE) da *Universidade Washington em Saint Louis*¹. Este consiste um sistema de dados digitais distribuídos que a NASA utiliza para arquivar e disponibilizar para a comunidade científica os dados coletados por todas as missões planetárias.

Como Parâmetro a ser medido em 10 dunas barcanas no Leste de *Herschel* e 10 Barcanas no Oeste da cratera *Herschel* a relação entre largura e comprimento conforme Bourke & Goudie (2009). Estas dunas foram selecionadas de forma a serem representativas das diferentes morfologias das dunas e a diversas situações de interação com o relevo. A Figura 4 traz um esquema de formas idealizadas de barcanas razões de aspecto a/c onde, a representa o comprimento da face de barlavento e c , a largura da duna de chifre a chifre.

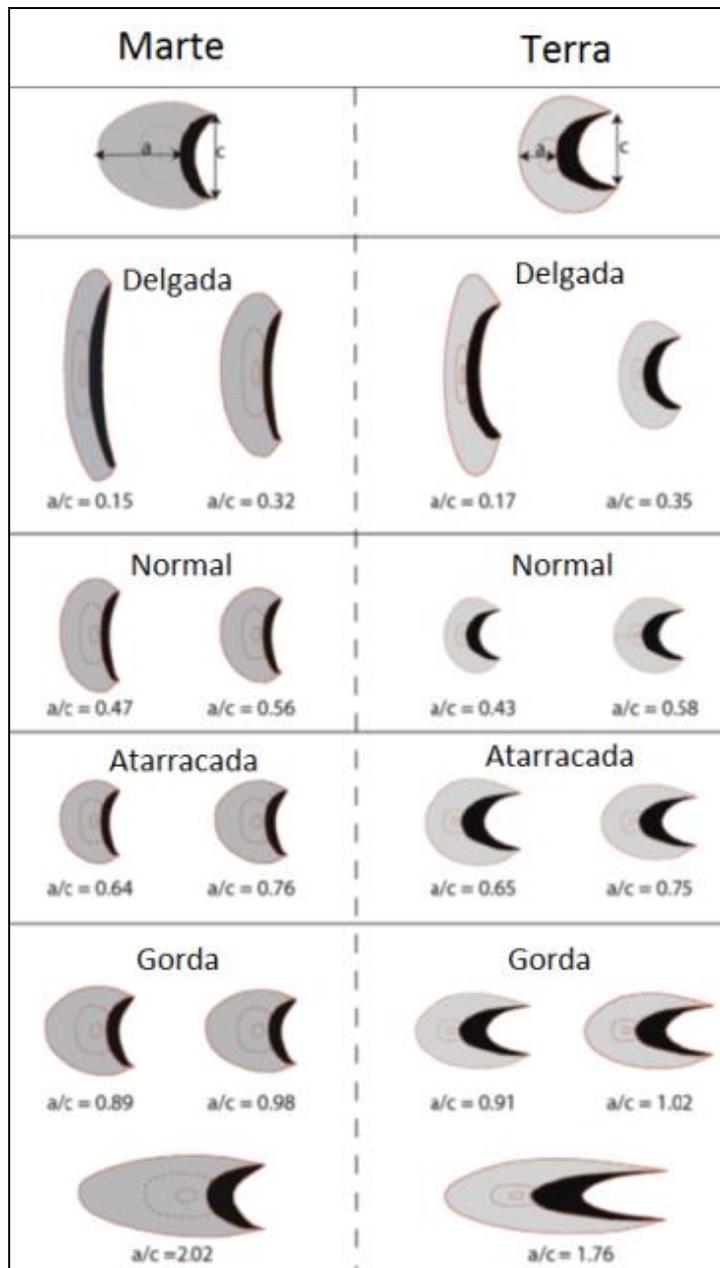
Em Marte (coluna da esquerda) há exemplos de dunas mais delgadas e mais gordas que as dunas terrestres (coluna da direita). Assim temos: Dunas Delgadas 0,125- 0,375; Dunas Normais 0,375- 0,625; Dunas Atarracadas 0,625- 0,875; Dunas Gordas $>0,875$.

Também foram medidos parâmetros verticais como altura da crista (HC), altura da face de escorregamento (HS), declividade da face de escorregamento e a

¹ Disponível em <<http://ode.rsl.wustl.edu/mars>> Acessado em 19 ago.2019.

curvatura do topo (dado qualitativo significativo). Parâmetros horizontais como azimute e área completam a análise.

Figura 4 – Assimetria das barcanas



Fonte: Adaptação de Bourke & Goudie (2009)

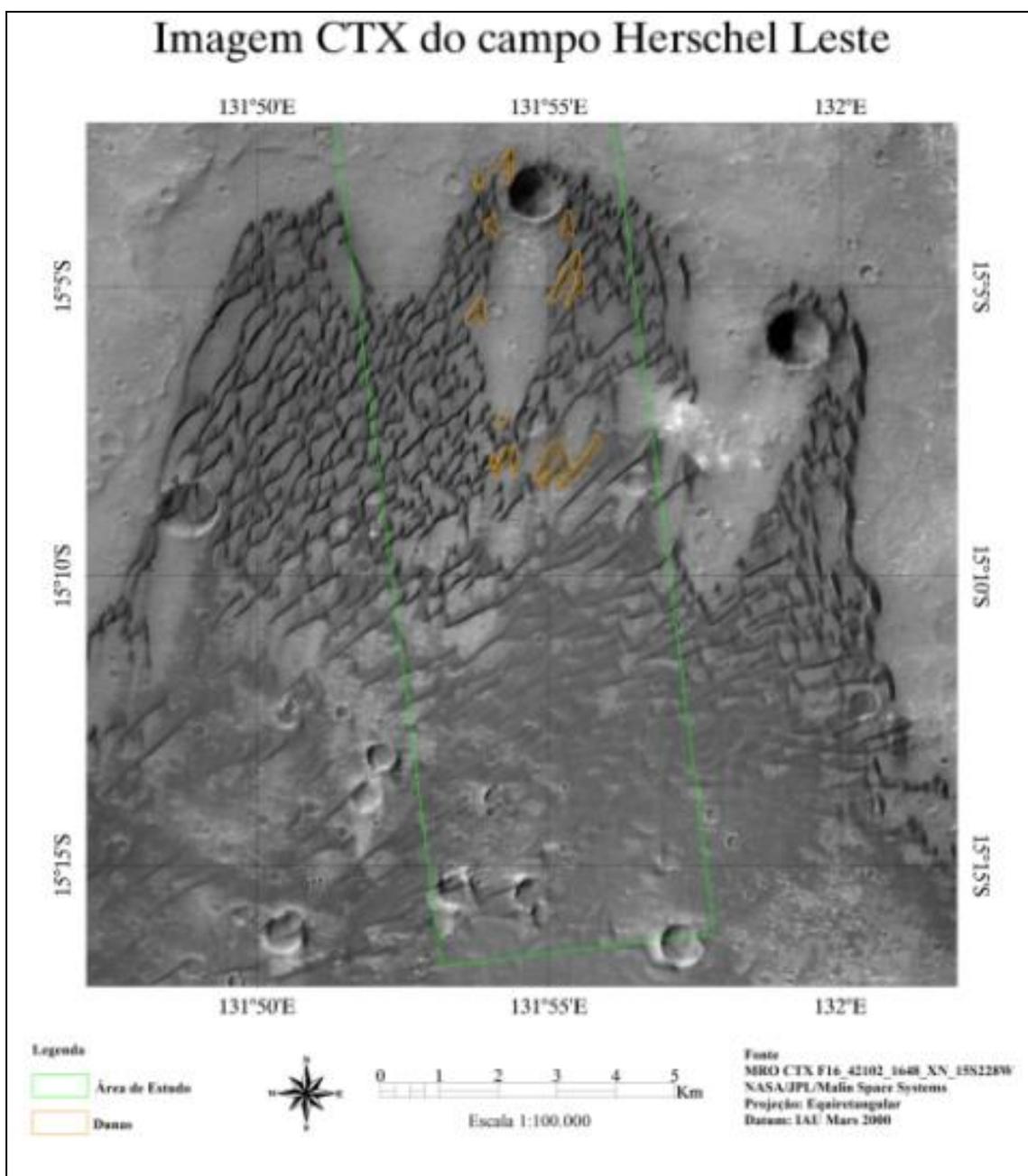
Morfologia das dunas em Herschel Leste

O campo Herschel leste é um campo de dunas livre, situado entre pequenas crateras simples. Enquadrando dentro do mapa de Greeley & Guest (1987) na unidade, Hr caracterizada por amplas superfícies planas com algumas colinas do tipo cumes enrugados (*wrinkled ridges*) similares as *maria* basálticas lunares. Interpretação: lava de baixa viscosidade. O Mapa geomorfológico de Edgett,(1991) enquadra o leste de Herschel dentro da unidade ih-depósitos interiores com

colinas, que podem ser uma mistura de brecha de impacto com depósitos sedimentares, típicos de áreas entre os anéis de impacto erodidos e a borda da cratera.

A Figura 5 traz uma imagem de contexto da Câmera CTX, do campo de dunas no setor Leste da Cratera Herschel. Percebe-se que o padrão de protomegabarcana, similar às observadas no Deserto na Namíbia, descrita por é interrompido por uma cratera de impacto simples de 947 m de diâmetro e 32,12m de altura da borda. Estes intervalos possuem cerca de 1,11 km de largura e 3,3 km de comprimento. A direção dos braços mais longos aponta para o centro.

Figura 5 – Imagem CTX do campo Herschel Leste



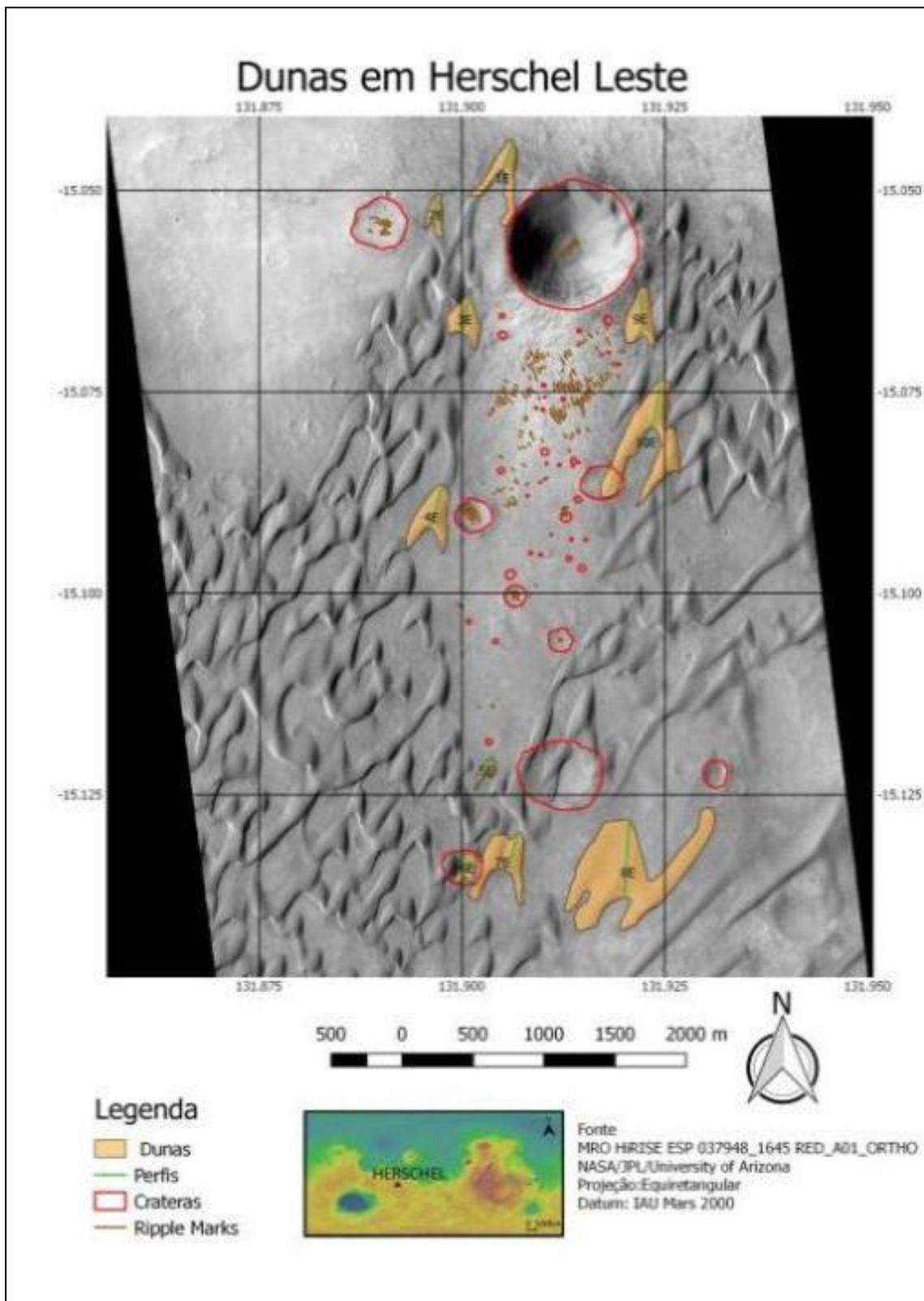
Fonte: Os Autores

A Figura 6 traz a imagem do sensor HIRISE do campo de dunas do campo Herschel Leste. As dunas 1E e 2E estão localizadas a NW, barlavento de uma cratera de impacto simples de 947m de diâmetro. Um dos braços da duna 1E está escalando a borda da cratera principal. A duna 3E está localizada na saída. A duna 4E situa-se ao lado de uma cratera de 242 m de diâmetro. Apresenta depósitos de transgressão e acresção bem definidos. A duna 5E localiza-se próximo a junção dos campos no final da zona de sombra da cratera. A duna 6E apresenta-se no interior de uma cratera de impacto. Manchas (*Sploches*) de material escuro deflatado da cratera. A orientação dos *Spotches* também é um indicador da direção do vento. A duna 7E é formada por duas dunas aglutinadas. A duna 8E localiza-se ao sul do campo, sendo uma transição/colisão com dunas transversais. A duna 9E, a maior duna do campo em altura, colisão lateral de Barcanas gordas, e a duna 10E a sotavento da cratera, com uma colisão fora de centro (*off-center*) de múltiplas dunas e um dos chifres sendo capturado por uma pequena cratera de 202 m de diâmetro.

Na zona de sombra e no interior das crateras, ocorrem Ripple Marks de material félsico, em média de aproximadamente 1,5 m de altura e 50 m de comprimento. Algumas possuem orientação NE-SW, acompanhando a direção geral do campo, porém outras, na região central da sombra de vento apresentam orientação W-E. Ocorrem na área pequenas crateras de aproximadamente 25m de diâmetro e 1 m de profundidade. Em verde podemos ver a demarcação dos perfis topográficos de onde foram medidos os valores de comprimento das dunas. O espaçamento médio entre as dunas é de aproximadamente 600m.

Dunas gordas ocorrem em locais como os Lençóis Maranhenses, um grande campo de dunas de 1550 km² no Nordeste do Brasil. Porém diferentes de outras áreas com dunas similares como Sinai ou White Sands, esta é uma região de clima úmido, com precipitação entre 1500 e 2000 mm de precipitação anual. De acordo com Parteli (2009), as velocidades do vento máximas são de 19,4 m/s, com médias de velocidades de 8.3 m/s durante a estação seca (Agosto-Dezembro) e 6,1 m/s durante a estação úmida (Janeiro-Julho), predominando direção E-W.

Figura 6– Imagem HIRISE do Campo Herschel Leste



Fonte: Os Autores

A Tabela 1 descreve parâmetros horizontais das dunas no campo Herschel Leste. Todas as barcanas identificadas no campo a leste de Herschel são de barcanas gordas. Barcanas gordas conforme Hargitai (2014) são caracterizadas com amplas faces de barlavento. Elas se desenvolvem sobre baixa velocidade de cisalhamento e substancial suprimento de areia. Dunas Gordas e atarracadas tendem a ocorrer nas bordas de campos de dunas, especialmente em locais onde o controle topográfico do vento se faz presente, como complementam Bourke & Goudie (2009). Outro parâmetro horizontal é a área cuja média das dez dunas é 104.970m². A maior área é a da duna 8E com 422.102 m² e a menor área a 5E com 13.077m². “O azimute médio é de 189° 29’34”.

Tabela 1 – Dunas no leste de Herschel - Parâmetros Horizontais

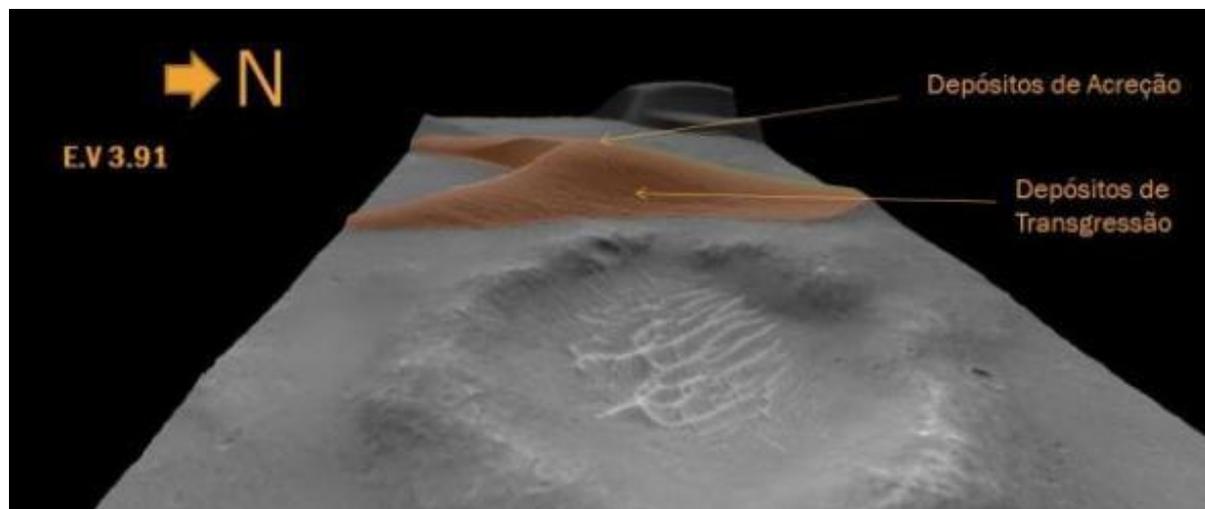
Duna	Comprimento a (m)	Largura c (m)	a/c	Área (m ²)	Tipo	Azimute
1E	209,168	111,342	1,878	67.079	Gorda	196° 15' 33"
2E	162,533	77,584	2,095	24.749	Gorda	188° 25' 26"
3E	272,587	190,182	1,433	54.980	Gorda	190° 08' 08"
4E	275,893	249,098	1,108	81.055	Gorda	194° 46' 21"
5E	118,075	114,190	1,034	13.077	Gorda	194° 59' 06"
6E	112,703	96,898	1,163	22.552	Gorda	182° 12' 51"
7E	273,501	279,087	0,980	98.813	Gorda	196° 00' 20"
8E	345,820	352,339	0,981	422.103	Gorda	183° 28' 44"
9E	201,652	116,744	1,727	63.191	Gorda	180° 20'05"
10E	333,746	255,223	1,308	202.108	Gorda	188° 19'04"
Médias	230,568	184,269	1.371	104.971	-	189° 29'34"

Fonte: Os Autores

A Figura 7 traz uma imagem tridimensional da duna 4E, a segunda duna mais alta do campo Herschel leste fornece uma oportunidade interessante de observar o perfil estrutural das dunas barcanas demonstrada por Pye & Tsoar (2004). Toda a

areia do topo representa depósitos de tracionais ou de acreção, movidos pelo processo de saltação, abaixo deste nível encontramos depósitos de transgressão, constituídos por depósitos laminares e avalanches de fluxo de grãos.

Figura 7 – Cena 3D da Duna 4E, Herschel Leste



Fonte: Os Autores

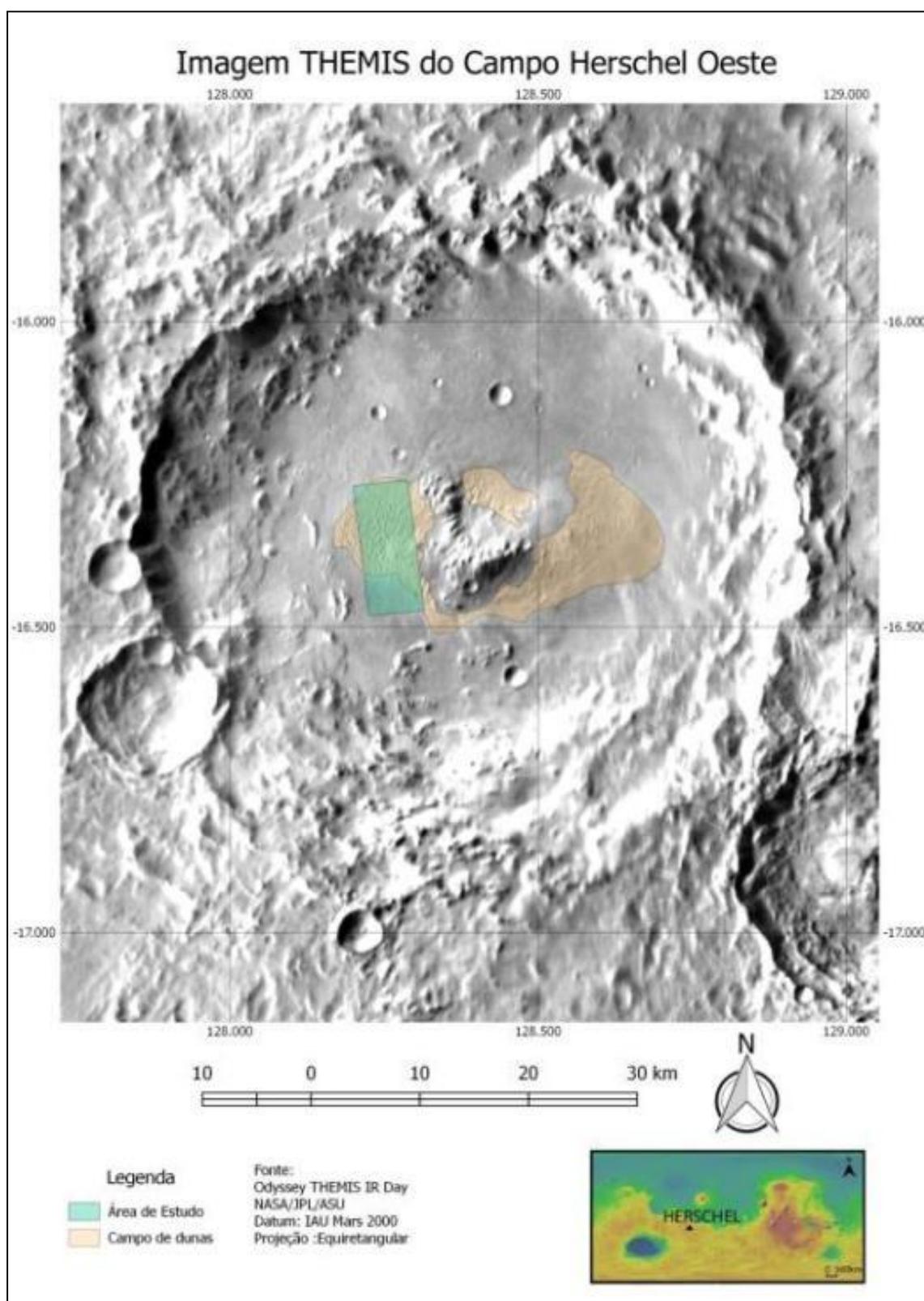
Além das Megabarcanas da Namíbia anteriormente descritas, existem outros ambientes análogos terrestres que apresentam algumas características similares às observadas em Heschel. Wolfe Creek, Austrália Miller et al (2018) apresenta uma cratera de impacto (Astroblema), bem preservada de aproximadamente 885 m de diâmetro e 30 m de altura da borda, praticamente idêntica em dimensões a cratera principal presente no campo Herschel Leste. Porém o tipo de dunas presentes são as dunas lineares, e o vento predominante na região é o E-W.

Como um análogo terrestre podemos citar o campo de dunas entre a Praia da Joaquina e a Lagoa da Conceição, na porção sudeste da Ilha de Santa Catarina, conforme apresentado por Bigarella (1979) apresenta ventos predominantes de Norte e uma escarpa com afloramentos graníticos que criam também uma zona de sombra. Porém as dunas apresentam-se alongadas (parabólicas) devido a tempestades vindas do Sul (frentes frias associadas a Massa Polar Atlântica), umidade e vegetação. Também ocorrem dunas domo, já estacionárias e sem face de escorregamento, a barlavento das escarpas. Há ocorrência de *blowout pits*, uma vez que a Praia da Joaquina possui pouca areia para compensar a deflação dos ventos de tempestade vindos do Sul.

Morfologia das dunas em Herschel Oeste

O campo Herschel Oeste, localiza-se no interior grande cratera de impacto complexa, de 64,18 km de diâmetro na margem sudoeste da cratera Herschel. Este campo está distante 231 km a SW do Campo Herschel Leste. A cratera possui 2634,39 m de profundidade. Apresenta um pico central soerguido em forma de L, com 1100,69 m de altitude. Encontra-se rotacionado 25° no sentido anti-horário. A grande variação de tipos de dunas incluindo barcanas, barcanóides alongadas e dunas Estrela, refletem ventos de diferentes direções influenciados pela topografia e orientações das faces de escorregamento apresentam uma grande dispersão, o que está relacionado a um complexo regime local de ventos.

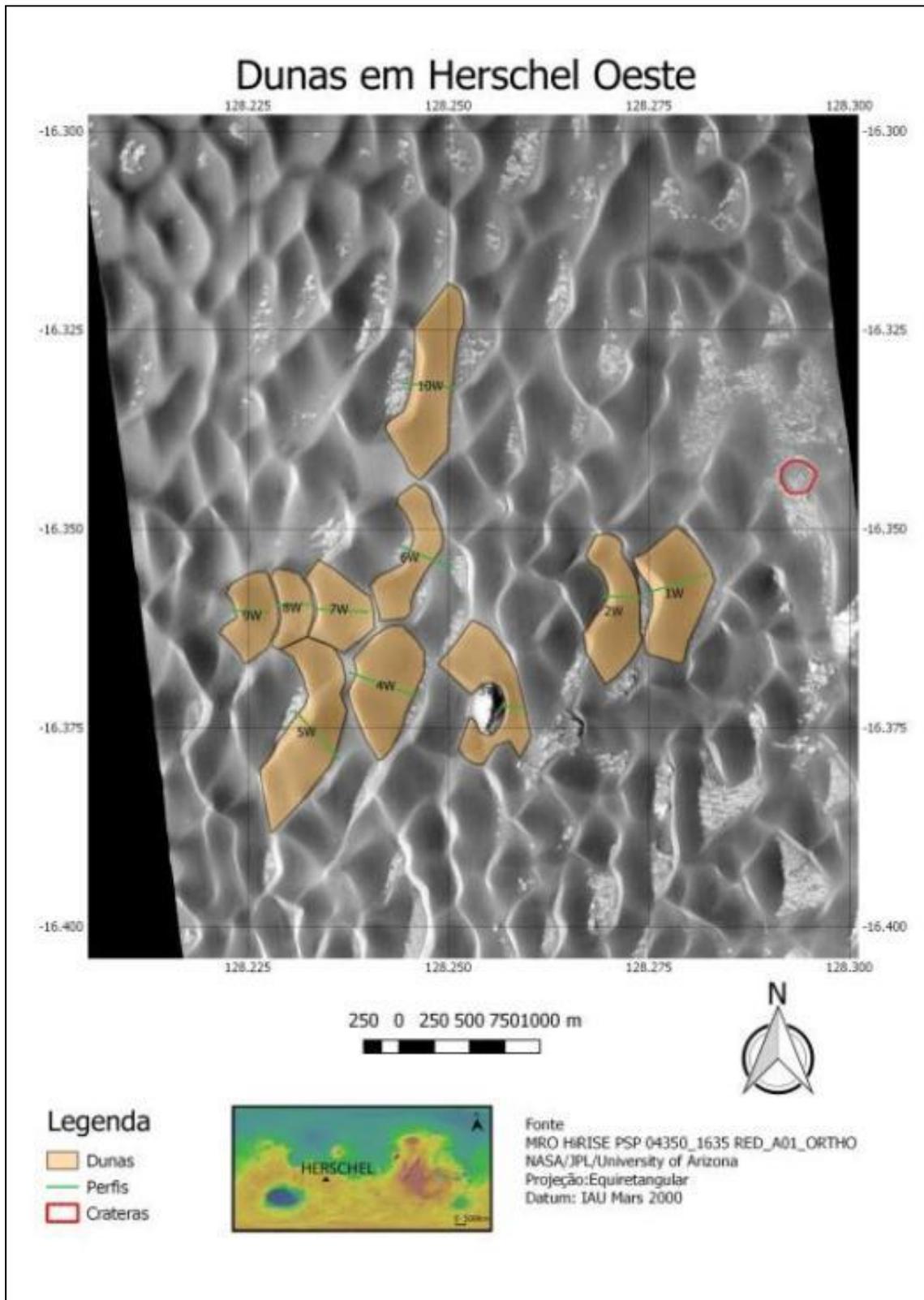
De acordo com o mapa de Greeley & Guest (1991) está localizado na unidade cs: Formam assoalhos planos a moderadamente ondulados da maioria das crateras de impacto que possuem bordas contínuas. Interpretação: principalmente depósitos eólicos, movimentos de massa ou depósitos de fluviais, principalmente de idade amazoniana, considerado no mapa de Edgett (1991) unidade sm- depósitos aplainados. A Figura 8 traz uma imagem de contexto Themis. O retângulo verde é o *footprint* da imagem PSP 04350_1650.

Figura 8 – Imagem THEMIS do campo Herschel Oeste

Fonte: Os Autores

A imagem HIRISE na Figura 9, mostra o campo de Herschel Oeste em detalhes. Podemos observar que as dunas 1W, 2W, 6W, 7W, 8W e 9W formam um comboio, enquanto 3W, 4W e 5W formam outro comboio. Percebe-se que a duna 3W, extremamente delgada, na forma de uma letra C invertida, que inicia este segundo comboio, encontra-se ancorada em um *Yardang* de 385,64 m de largura e 37,80 m de altura. *Yardangs*, conforme Bridges & Laity (2013) são cumes, com de forma geralmente alongada com um grande eixo paralelo a direção do vento mais forte. Apresentam facetas planas e polidas como clara indicação de abrasão eólica. Em Marte, *yardangs* são amplamente alastrados, indicando que a abrasão é significativa em escala planetária. Em comparação ao campo Herschel Leste aparenta possuir um maior depósito de areia. Em verde podemos ver os perfis topográficos das dunas em Herschel Oeste, O espaçamento médio entre as dunas é de, aproximadamente, 300m. Ocorre neste campo apenas uma única cratera de impacto de, aproximadamente, 240 m de diâmetro e 9,1 m de profundidade, localizada no extremo leste da imagem.

Figura 9 – Imagem HiRISE do Campo Herschel Oeste



Fonte: Os Autores

No campo do oeste da cratera Herschel, como visto na Tabela 2 das 10 dunas estudadas, 5 delas são delgadas e 2 delas normais. Bourke & Goudie (2009) caracterizam estes tipos de dunas como feições de área com regime de vento

unidirecional, com pouco influxo de areia e altas velocidades de vento *stress* de cisalhamento. Quanto a média das 10 áreas é de 305.268,700 m², sendo a maior área 476.275 m² na duna 5W, e a menor duna é a 8W com 129.736 m². “A média dos azimutes é de 278°18’59”.

Tabela 02 – Dunas no Oeste de Herschel-Parâmetros Horizontais

Duna	Comprimento a (m)	Largura c (m)	a/c	Área (m ²)	Tipo	Azimute
1W	336,599	672,886	0,500	370.913,460	Normal	248°44’21”
2W	186,420	552,829	0,337	301.545,641	Delgada	272°10’48”
3W	91,283	603,407	0,151	325.617,960	Delgada	272°14’49”
4W	428,643	248,139	1,727	360.582,908	Gorda	290°19’18”
5W	305,972	857,343	0,357	476.275,511	Delgada	318°34’43”
6W	272,091	649,557	0,419	237.862,839	Normal	293°02’40”
7W	307,468	419,423	0,733	222.756,177	Atarracada	273°23’20”
8W	183,086	506,224	0,362	129.736,317	Delgada	267°05’23”
9W	188,607	284,443	0,663	193.486,447	Atarracada	271°23’48”
10W	229,412	754,758	0,304	433.909,736	Delgada	276°10’36”
Médias	252,958	530,083	0,566	305.268,700	-	278°18’59”

Fonte: Os Autores

Análise dos Parâmetros verticais

Análise dos parâmetros verticais das dunas no campo Herschel leste, descritas na Tabela 6 A Altura HC é de 14,420m, sendo a duna mais alta a duna 9E com 26,964m. A duna mais baixa do campo é a 2E, com 8,416m. É um fato notável que as dunas mais altas e íngremes são justamente aquelas localizadas ao lado das crateras de impacto. Existe uma predominância de dunas de topo com curvatura convexa, com as dunas 3E e 9E apresenta a curvatura do topo retilíneo. Este efeito é causado pelos ventos mais intensos, gerado pelos vórtices ferradura, que levam a deposição de material que foi erodido das bordas da cratera. As dunas 1E, 3E, 4E e

9E apresentam declividade acima dos 32° na face de escorregamento. A duna 8E apresenta uma declividade bastante suave de 4,28°. A média das 10 dunas é de 27,83°, porém ao se desconsiderar a duna 8E (valor *outlier*) esta média sobe para 30,45°.

Tabela 03 – Dunas no campo Herschel Leste-Parâmetros Verticais

Duna	Altura da Crista (HC) m	Altura da Face (HS) m	Curvatura	Declividade (°)
1E	17,112	15,511	Convexa	33,78°
2E	8,416	4,035	Convexa	25,04°
3E	10,491	9,962	Retilínea	34,77°
4E	20,571	18,698	Convexa	32,47°
5E	8,507	7,080	Convexa	29,31°
6E	9,718	8,155	Convexa	28,49°
7E	11,151	8,815	Convexa	31,34°
8E	10,120	7,899	Convexa	4,28°
9E	26,964	25,754	Retilínea	32,34°
10E	21,155	11,199	Convexa	26,49°
Médias	14,420	11,710	-	27,83°

Fonte: Os Autores

Os parâmetros verticais dos perfis topográficos de Herschel Oeste, descritas na Tabela 4. A Altura HC 25,443, sendo a duna mais alta a duna 5W com 58,747m. A duna mais baixa do campo é a 8W, com 7,693m. Também ocorre uma predominância de dunas com perfil convexo, com as dunas 1W, 3W, 5W retilínea, e a duna 7W apresenta um topo convexo-retilíneo Apenas a duna 2W possui ângulo de declividade acima dos 32°. A média das declividades na face escorregamento é de 27,08°. Em geral as duas áreas apresentam declividades médias similares, porém o Campo Oeste apresenta uma variabilidade menor.

Tabela 4 – Dunas no Herschel Oeste -Parâmetros Verticais

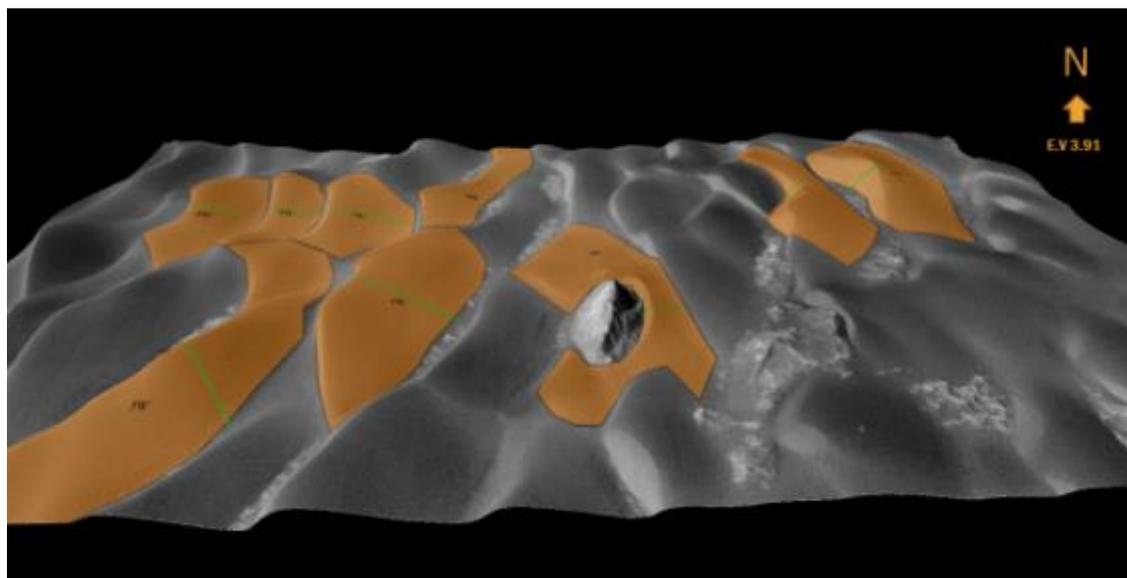
Duna	Altura da Crista	Altura da Face	Curvatura	Declividade
------	------------------	----------------	-----------	-------------

	(HC) m	(HS) m		(°)
1W	48,672	46,551	Retilínea	29,58°
2W	26,284	19,653	Convexa	32,93°
3W	14,997	13,937	Retilínea	31,31
4W	26,214	19,829	Convexa	30,79°
5W	58,747	55,551	Retilínea	29,48°
6W	10,452	8,700	Convexa	23,77°
7W	18,899	14,866	Convexa- Retilínea	29,34°
8W	7,693	4,408	Convexa	15,10°
9W	19,325	15,449	Convexa	30,20°
10W	23,142	20,275	Convexa	18,30°
Médias	25,443	21,921	-	27,08°

Fonte: Os Autores

No caso de Herschel Oeste visto na Figura 10, é notável o processo de alongação das dunas. Considerando que os ventos predominantes neste campo são oblíquos ou opostos a face de escorregamento das dunas. Nota-se um formato diferenciado nas dunas com amplas faces de barlavento que acabam tornando-se área de deposição, gerando uma forma trapezoidal ou de dente molar. Há pouquíssimo desenvolvimento dos chifres como ocorre no campo de Herschel Leste.

Segundo Tsoar & Blumberg (2004) a ocorrência de erosão ou deposição depende do ângulo de incidência entre o vento e a linha da crista. Quando o ângulo é $< 40^\circ$, o vento defletido tem o poder de erodir areia ao longo da face de barlavento. Quando o vento é próximo de 90° a velocidade do vento divergente cai e ocorre a deposição. Os ventos bidirecionais geram picos e alças na face de escorregamento. A falta de uniformidade na direção dos ventos resulta em uma irregularidade nas taxas de erosão e deposição. Como resultado ocorre à formação de uma série de picos e alças ao longo do comprimento das dunas. Os picos resultam da deposição mais efetiva e são erodidas pela menos efetiva. O oposto ocorre com as alças, recebendo a deposição dos ventos menos efetivos e a erosão dos ventos mais efetivos.

Figura 10 – Cena 3D do Campo Herschel Oeste

Fonte :Os Autores.

Como um análogo terrestre ao formato de dunas em forma de Oasis de Liwa, na tríplice fronteira entre Emirados Árabes Unidos, Oman e a Arábia Saudita, na margem do mar de areia de Rub Al Khali, Visto na Figura 11. Foi caracterizado por El-Sayed (2000) como uma megabarcana composta e complexa, marcada pela sobreposição de dunas menores. Devido o tamanho gigante das barcanas, as áreas interduna aparecem como depressões fechadas que podem variar em forma irregular, triangular a circular ou semicircular. A direção das faces de escorregamento é oposta a direção do vento predominante atual (Shamal, NNW) e em declive. Da perspectiva orbital pelo relato de Bishop (2010) as mudanças quanto à morfologia, orientação e tamanho das dunas podem ser explicadas pelas alterações direcionais e de intensidade do vento. Variações na topografia tiveram como consequência no volume de sedimento, crescimento das dunas e na disponibilidade para o transporte.

Figura 11 – Oasis de Liwa, Emirados Árabes Unidos

Fonte: NASA World Wind

Considerações Finais

O Estudo dos campos de dunas na cratera Herschel, por meio de análise de modelos climáticos, imagens orbitais de alta resolução espacial e modelos de terreno demonstra o controle topográfico sobre a atividade eólica e seus reflexos sobre os campos de dunas de forma distinta que podem ser resumidos da seguinte maneira:

1. No Campo Herschel Leste. Caracteriza-se pelo regime de ventos unimodal. Apresenta barcanas gordas e livres em aclave. Evolução para barcanóides axiais, com Dunas transversais. Possui megabarcana interrompida por cratera de impacto de 947m de diâmetro. Destaca-se como fenômeno a sombra de vento gerada pela cratera de impacto principal. Possui pouca variação de azimute. Ripple marks na região interduna influenciados pelo vento noturno e topografia. Condições similares foram identificadas em ambientes análogos terrestres como, White Sands, (Novo México), Wolfe Creek, (Australia) e a Lagoa da Conceição (Santa Catarina).
2. No Campo Herschel Oeste bimodal agudo. Apresentam dunas normais e delgadas em declive, algumas ancoradas em *Yardangs*. Muita variação de azimute. Como análogo terrestre, temos o Oasis de Liwa (Emirados Árabes Unidos /Arábia Saudita)

A aplicação de diversas técnicas levou a um todo coerente. Este trabalho de mapeamento planetário não apenas gera uma visão das relações espaciais e a

evolução geomorfológica das dunas dos campos de dunas em Marte e sua interação com as crateras, como também estabelece análogos com ambientes terrestres com condições similares. O mapeamento de alta resolução, estudos de padrões de dunas, informações morfométricas e modelos de vento de mesoescala são ferramentas familiares dos geógrafos. Os dados podem diferir, o planeta pode ser outro, porém as estratégias e os princípios da pesquisa geográfica são os mesmos.

REFERÊNCIAS

- Baker, V.R & Twidale, C R. **The Reenchantment of geomorphology**. Geomorphology 4, 73-100,1991.
- Bourke, M.C. & Goudie, A.S. **Varieties of barchan form in the Namib Desert and on Mars**. Aeolian Research 1 (2009) 45–54
- Bigarella, J.J. **The Lagoa dune field** In: Mckee, E.D. A study of global sand seas. Geological Survey Professional Paper 1052. Washington D.C: United States Government Printing Office, 1979.p 114-134.
- Bishop, M.A. **Nearest neighbor analysis of mega-barchanoid dunes, Ar Rub' al Khali, sand sea**: The application of geographical indices to the understanding of dune field self-organization, maturity and environmental change. Geomorphology 120 (2010) 186–194.
- Cardinale et al. Dunes in: Hargitai, H. & Kereszturi, A. **Encyclopedia of Planetary Landforms**. New York : Springer Science+Business Media,2015,2460p.
- Bridges, N.T. & Laity, J.E., Fundamentals of Aeolian Sediment Transport: Aeolian Abrasion In: Lancaster, N. & Sherman, D.J. (Eds). *Treatise of Geomorphology*, Vol 11, Aeolian Geomorphology. San Diego: Academic Press, 2013.437p.
- Edgett, K.S. **The ejecta deposit of the ancient basin Herschel** - an example of a generally unrecognized Martian sedimentological unit. Houston, TX, Lunar and Planetary Institute, 1991, p.657-667.
- El-Sayed, M.I. **The nature and possible origin of mega-dunes in Liwa, Ar, Rub' Al Khali, UAE**. Sedimentary Geology 134(3), 2000, p.305-330.
- Greeley, R & Guest J.E. **Geologic Map of the Eastern Equatorial Region of Mars**. U.S Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map 1-1802-B, scale 1:15.000.000. U.S Geological Survey, 1987.
- Hargitai, H. Dune-Field Patterns in Hargitai, H. & Kereszturi, A. **Encyclopedia of Planetary Landforms**. New York: Springer Science+Business Media, 2015, 2460p.
- McEwan, A.S, et al. (2007) **Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE)** J. Geophys. Res., 112, E05S02
- Melosh H. J. **Planetary Surface Processes**, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2011, 416 p.
- Parker, T.J A reassessment of Mars Ocean Hypothesis, **Second Conference on Early Mars**, Houston, TX: Lunar and Planetary Institute 3054, 2005
- Parteli, E.J. **Sand Dunes on Mars and on Earth**. Ph.D. Thesis. Institut für Computerphysik der Universität Stuttgart 2007.p.171.

- Pye, K & Tsoar, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. Berlin: Springer-Verlag, 2009, 475p.
- Saunders, R. S, et al. **2001 Mars Odyssey Mission summary**, Space Sci. Rev., 110, No. 1-2, 1-36, 2004.
- Seidelmann, P.K et al. **Report of the IAU/ IAG working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites**. 2000. Celest. Mech. Dyn. Astron. 82 (1), 83–111, 2002.
- Tsoar,H & Blumberg,D.**Elongation and Migration of sand dunes**. Geomorphology 57,2004, p.293-302.

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Diego Dal Pozzolo Dos Santos- Concepção. Coleta de dados, Análise de dados, Elaboração do manuscrito, revisão e aprovação da versão final do trabalho
Bernardo Sayão Penna e Souza– Concepção e elaboração do manuscrito. Coleta de dados Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

FINANCIAMENTO

Não se aplica.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

CONFLITO DE INTERESSES

Não se aplica.

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 06-05-2021

Aprovado em: 01-06-2023