



Delimitação Automática de Crateras de Impacto em Imagens HRSC da Superfície de Marte

Automatic Delineation of Impact Craters on HRSC Images of the Surface of Mars

Renan Furlan de Oliveira ¹ e Erivaldo Antônio da Silva ²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil. renan.furlan@ufsc.br.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1361-0356>

² Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, Brasil.
silva.ervaldo@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7069-0479>

Recebido: 06.2019 | Aceito: 04.2020

Resumo: Crateras de impacto são as estruturas mais estudadas nas ciências planetárias, devido à grande quantidade de informações que podem revelar sobre a história, geologia e processos físicos de um planeta. A necessidade de investigações sobre as crateras está aumentando, já que muitas missões estão sendo lançadas no espaço, adquirindo dados cada vez mais ricos e detalhados. Desenvolver algoritmos que detectem crateras em superfícies planetárias através de imagens tem sido o foco de pesquisas no mundo todo. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é desenvolver uma metodologia para detectar e delimitar, automaticamente e simultaneamente, crateras de impacto na superfície marciana. A abordagem baseia-se nos fundamentos da morfologia matemática e consiste em três etapas: (i) pré-processamento e filtragem para a remoção de ruídos e realce de bordas, (ii) segmentação pela transformação *watershed* e estratégias da dinâmica dos contornos para a detecção e delimitação das crateras, e (iii) pós-processamento para o refinamento da detecção. O conjunto de dados utilizado foi constituído por crateras representadas a partir de imagens de alta resolução espacial da superfície de Marte. Especificamente, imagens da *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) com resolução espacial de 12,5 m/pixel. As taxas globais de detecção verdadeira foram de 83,5%, enquanto as taxas de detecção falsa foram de 13,1%, considerando-se cerca de 1000 crateras com raio entre 500 e 1000 metros. Pode-se concluir que a abordagem proposta se apresentou de forma eficiente e, portanto, contribuiu para a solução de um problema atual no contexto da detecção e extração de crateras em superfícies planetárias.

Palavras-chave: Superfície de Marte. Crateras de impacto. Detecção e extração de feições. Processamento digital de imagens.

Abstract: Impact craters are the most studied structures in planetary sciences, due to the large amount of information that they can provide about the history, geology and physical processes of a planet. The need for investigations about impact craters is increasing, as many missions are being launched into space, acquiring increasingly rich and detailed data. Therefore, to develop an algorithm that automatically detects craters on planetary surfaces through images has been a focus of research worldwide. In this regard, we propose a methodology to detect and delineate automatically impact craters on the Martian surface. It is based on mathematical morphology operators and consists of three main steps: (i) filtering based on connected operators to noise removal and to highlight crater rims, (ii) segmentation based on the watershed transform and dynamics of contours to delineate the real contours of impact craters, and (iii) post-processing to exclude non-crater structures. The image dataset used for testing is constituted by craters depicted from high spatial resolution imagery from the surface of Mars. Specifically, images of High Resolution Stereo Camera (HRSC) with a spatial resolution of 12,5 m/pixel. The global values of the true detection rate was 83,51% and false detection rate was 13,11%, considering 1000 craters delineated with radius within 500 to 1000 meters. Thus, we concluded that the application of mathematical morphology and image processing techniques in a well-designed sequence can contribute to the solution of a current problem in the context of crater detection on planetary surfaces, especially in high spatial resolution images.

Keywords: Surface of Mars. Impact crater. Detection and extraction of features. Image processing.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos sobre as crateras de impacto na superfície de Marte têm contribuído, cada vez mais, para a compreensão de processos geológicos e, conseqüentemente, para o entendimento da história deste corpo planetário. A partir do conhecimento da geomorfologia das crateras, bem como de suas morfologias, várias informações podem ser reveladas, as quais são importantes tanto para a compreensão do processo natural de degradação destas feições (SODERBLOM et al., 1974; SWEENEY et al., 2018), quanto para o conhecimento da exploração espacial em geral. Uma vez que o homem tem se preparado para o envio de missões espaciais tripuladas à Marte, conhecer essa superfície, bem como as crateras em relação à localização, morfologia e demais características, pode auxiliar futuras missões no que se refere, por exemplo, à determinação de locais seguros para aterrissagem. Nas ciências planetárias, as crateras são as estruturas mais estudadas, devido à grande quantidade de informação que uma análise detalhada de sua distribuição e morfologia pode revelar. As estatísticas sobre o tamanho das crateras de impacto formaram a base para a estratigrafia tanto da Lua quanto de Marte (CRATER ANALYSIS TECHNIQUES WORKING GROUP, 1979; TANAKA, 1986; TANAKA, 2014). Além disso, tais estruturas ainda representam a única possibilidade para inferir, remotamente, a idade relativa de formações geológicas desses corpos planetários (WERNER, 2014).

Pesquisadores do mundo todo têm proposto diferentes metodologias com a finalidade de detectar e extrair diversas feições em corpos planetários (BANDEIRA et al., 2011; STATELLA; PINA; SILVA, 2012; PALAFOX et al., 2017; WARDLAW et al., 2017). Dentre as diversas feições de interesse e as superfícies que vêm sendo alvo de investigações pela comunidade científica, destacam-se as crateras de impacto em Marte (BANDEIRA; DING; STEPINSKI, 2012; PEDROSA et al., 2017; XIN et al., 2017). De forma geral, as abordagens de detecção e extração de feições, encontradas na literatura, se divergem em três pontos principais. O primeiro está relacionado aos tipos de dados utilizados, os quais podem ser imagens ópticas ou dados de topografia, extraídos a partir de modelos digitais de terreno, por exemplo. O segundo ponto diz respeito ao uso de diferentes técnicas de processamento digital de imagens. Enquanto o terceiro ponto se refere ao processo de detecção das crateras de impacto, podendo ser caracterizado como manual, semiautomático ou automático.

Se por um lado, muitos trabalhos com o objetivo de detectar crateras em superfícies planetárias já foram desenvolvidos, por outro, nota-se a necessidade de mais investigações e integrações de técnicas para sanar os problemas encontrados nos métodos desenvolvidos até o presente momento (SALAMUNIĆCAR et al., 2011; BANDEIRA; DING; STEPINSKI, 2012; PEDROSA et al., 2017). As dificuldades se referem principalmente ao fato de as crateras serem feições de difícil distinção em relação às demais estruturas. Na maioria das situações, as crateras têm as suas bordas erodidas devido ao tempo de sua formação; raramente há uniformidade nas superfícies nas quais estão inseridas; as imagens das superfícies planetárias são adquiridas sob diferentes condições de iluminação, diferentes resoluções e qualidade; e os tamanhos das crateras se diferem em ordens de magnitude (KIM et al., 2005; BANDEIRA et al., 2011).

Quanto aos algoritmos e metodologias, na maioria dos casos, promovem a detecção de crateras de impacto por meio de formas circulares perfeitas, o que os tornam suficientes para investigações e estudos cronoestratigráficos (HARTMANN; NEUKUM, 2001), mas não para caracterizações completas das feições. Para realizar estas caracterizações, é necessária uma análise completa da cratera e seu entorno, englobando não apenas parâmetros relacionados à sua forma ou material ejetado, mas também os descritores da irregularidade do contorno e a identificação de partes quebradas ou ausentes do contorno (MARQUES; PINA, 2015). Além disso, os diversos catálogos de crateras vêm sendo construídos, em sua maioria, por processos manuais, com limitações principalmente quanto ao tamanho das crateras (RODIONOVA et al., 2000; SALAMUNIĆCAR et al., 2011; ROBBINS; HYNEK, 2012). O fato de não haver catálogos globais com crateras subquilométricas deve-se a existência de uma grande quantidade destas feições com diâmetros menores que 1 km, o que torna inviável a identificação manual das crateras de impacto (URBACH; STEPINSKI, 2009).

Diante do contexto apresentado, o objetivo da presente pesquisa foi desenvolver uma metodologia para detectar e delinear, automaticamente e simultaneamente, crateras de impacto subquilométricas em imagens de alta resolução espacial da superfície de Marte. A abordagem foi baseada, principalmente, nos fundamentos da morfologia matemática, bem como em demais técnicas de processamento digital de imagens e reconhecimento de padrões aplicadas a imagens da *High Resolution Stereo Camera* (HRSC).

2 IMAGENS HRSC

A missão *Mars Express* (MEX), proposta e desenvolvida pela *European Space Agency* (ESA), entrou em operação em 2004, com objetivos relacionados a diversos estudos e com foco principal na investigação da atmosfera, geologia, caracterização de estruturas da subsuperfície e na composição da superfície marciana (CHICARRO; MARTIN; TRAUTNER, 2004). Dentre os instrumentos a bordo da MEX, utilizados para o monitoramento e o mapeamento da superfície de Marte, destacam-se: *High Resolution Stereo Camera* (HRSC), *Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer* (OMEGA) e *Sub-Surface Sounding Radar Altimeter* (MARSIS).

No que diz respeito à câmera HRSC, o seu sistema operacional envolve, basicamente, dois complexos principais. O primeiro tem o objetivo de realizar o processamento sistemático de dados brutos, enquanto o segundo é voltado para o processamento fotogramétrico das imagens, com foco na elaboração de ortoimagens e produtos tridimensionais (SCHOLTEN et al., 2005). A HRSC é capaz de capturar imagens ópticas com resoluções espaciais entre 10 m/pixel e 50 m/pixel ou mais, dependendo da resolução do *grid* (JAUMANN et al., 2007; GWINNER et al., 2010). Na presente pesquisa, foram consideradas e utilizadas imagens de regiões da superfície de Marte que despertassem maior interesse da comunidade científica. Neste sentido, a região *Aeolis* foi escolhida como área teste. Cabe destacar que esta região possui uma ampla cobertura de imagens, suficiente para a realização dos experimentos, além de abranger estruturas muito importantes consideradas em diversas pesquisas na área de ciências planetárias, como a cratera *Gale* (THOMSON et al., 2011; RAPIN et al., 2018; MINITTI et al., 2019).

Oito imagens originais da câmera HRSC foram selecionadas, as quais encontram-se georreferenciadas e possuem resolução espacial de 12,5 m/pixel. A Tabela 1 apresenta algumas das características das imagens, como nome, projeção, dimensão em pixels (coluna x linha) e resolução espacial.

Tabela 1 – Características das imagens HRSC selecionadas.

Imagem	Projeção	Dimensão (pixels)	Resolução espacial (m/pixel)
h2070_0000	Sinusoidal	5424 x 76032	12,5
h1982_0000	Sinusoidal	5856 x 65080	12,5
h2004_0000	Sinusoidal	5080 x 79824	12,5
h4191_0000	Sinusoidal	5664 x 43344	12,5
h2037_0000	Sinusoidal	5192 x 74016	12,5
h1960_0000	Sinusoidal	6808 x 58040	12,5
h2081_0000	Sinusoidal	5680 x 74208	12,5
h2059_0000	Sinusoidal	5176 x 49800	12,5

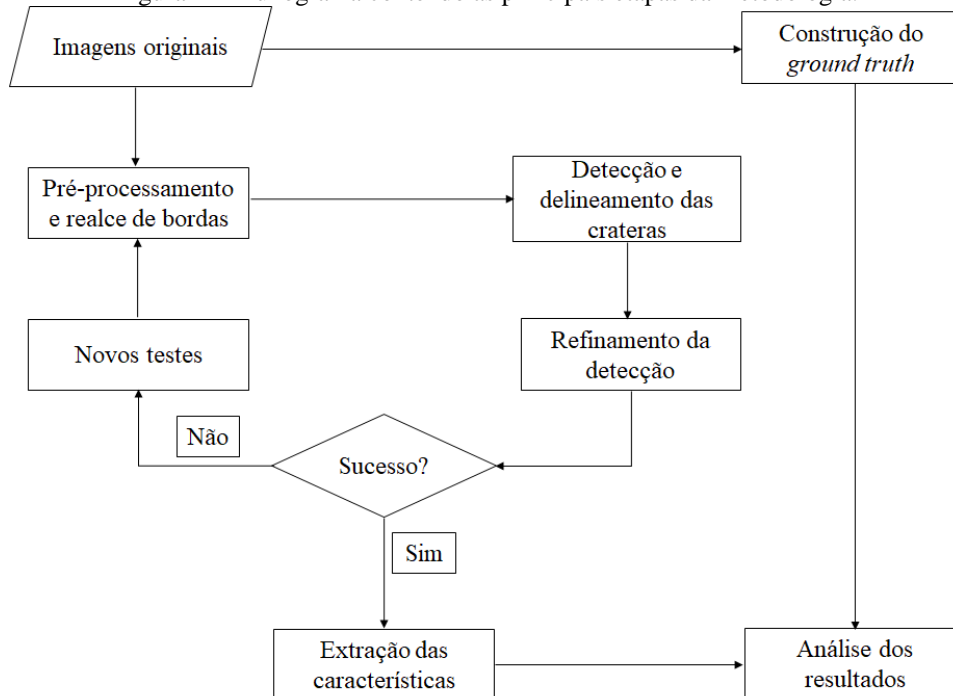
Fonte: Os autores (2020).

3 METODOLOGIA

A metodologia de detecção e delineamento automático de crateras de impacto em imagens HRSC da superfície de Marte se baseia nos princípios da morfologia matemática, bem como na aplicação de técnicas de processamento digital de imagens e reconhecimento de padrões. A metodologia, portanto, foi conduzida em três etapas principais: o pré-processamento das imagens HRSC com foco na remoção de ruídos e realce das bordas das estruturas presentes nas cenas; a detecção e o delineamento das estruturas candidatas a crateras de impacto a partir da segmentação pela transformação *watershed* e por meio de recursos e estratégias da dinâmica dos contornos; e o pós-processamento voltado para o refinamento do delineamento das estruturas de interesse, bem como para a remoção dos ruídos restantes do processamento.

O algoritmo proposto com foco na detecção e delineamento automático das crateras de impacto foi desenvolvido com auxílio da toolbox de morfologia matemática da SDC *Information Systems* para o *software* MATLAB. A Figura 1 apresenta um fluxograma contendo as principais etapas da metodologia.

Figura 1 – Fluxograma contendo as principais etapas da metodologia.



Fonte: Os autores (2020).

Em consequência da grande dimensão das imagens HRSC, as imagens originais foram recortadas em sub-imagens, com dimensões de 2500 x 2500 pixels. Este procedimento foi adotado devido à limitação do MATLAB, no que diz respeito ao tempo de processamento de um grande volume de imagens com grandes dimensões. Dessa forma, 85 recortes de imagens HRSC foram considerados. As imagens estão associadas a projeção sinusoidal e ao sistema de referência GCS *Mars* 2000, de acordo com os metadados. O *download* das imagens ortorretificadas foi realizado, gratuitamente, na plataforma HRSC *webGIS* (ESA, 2018).

3.1 Pré-processamento

A primeira etapa da metodologia, conforme ilustra a Figura 1, consistiu no pré-processamento dos recortes das imagens HRSC. Nesta etapa, foram utilizados operadores morfológicos para remover os ruídos indesejados, bem como para realçar as bordas das estruturas presentes nas imagens. O grande desafio desta primeira etapa foi encontrar uma técnica ou uma sequência de operações que promovesse o equilíbrio entre a remoção da maioria dos ruídos indesejados e a preservação das bordas das estruturas de interesse. Portanto, com o objetivo de melhorar o contraste entre as feições presentes nas cenas, foi utilizada a técnica *toggle contrast mappings*, introduzida por Serra (1988). Esta técnica é baseada em operações de erosões e de dilatações, o que permite realçar as bordas das estruturas, respeitando a forma e a dimensão do elemento estruturante. Diante disso, o elemento estruturante foi definido na forma de disco, com dimensão igual a dois.

Segundo Serra (1988), a técnica *toggle contrast mappings*, aplicada a imagens em tons de cinza, consiste no aprimoramento ou melhora da imagem f por um operador de alternância, a partir dos parâmetros f_1 e f_2 . Neste aprimoramento, um pixel assume o valor do pixel correspondente em f_1 ou f_2 , de acordo com um critério de distância mínima, seja de f a f_1 ou de f a f_2 . Dessa forma, esta técnica deve ser utilizada para otimizar a redução de ruído ou melhora do contraste das estruturas presentes na imagem, de acordo com a seguinte equação (Eq. 1):

$$(f_1[f]f_2) = \begin{cases} f_1(x), & \text{se } (f - f_1)(x) \leq (f_2 - f)(x) \\ f_2(x), & \text{caso contrário} \end{cases}, \tag{1}$$

em que f é a imagem original, f_1 é a imagem original erodida e f_2 é a imagem original dilatada.

A partir da imagem filtrada pela técnica *toggle contrast mappings*, aplicou-se o gradiente morfológico

por dilatação e erosão, com a finalidade de realçar, ainda mais, os locais de ocorrência de bordas. Segundo Soille (2004), o gradiente morfológico consiste na subtração entre a dilatação da imagem de entrada $\delta_{B_{dil}}(f)$ e a erosão da mesma imagem $\varepsilon_{B_{ero}}(f)$, conforme a equação (Eq. 2):

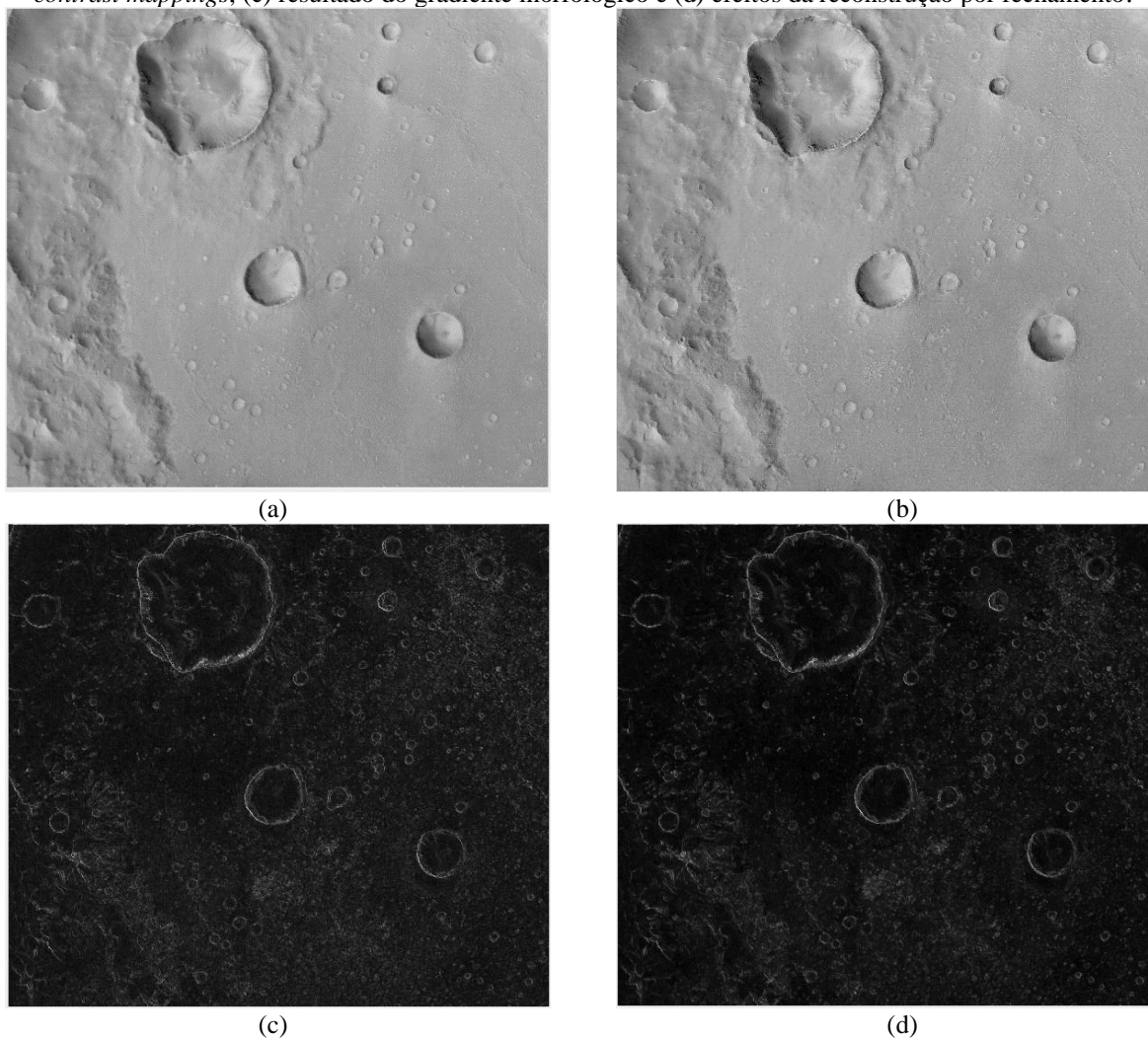
$$\Psi_{B_{dil}, B_{ero}}(f) = \delta_{B_{dil}}(f) - \varepsilon_{B_{ero}}(f). \quad (2)$$

Em seguida, após a obtenção do gradiente morfológico, aplicou-se a reconstrução morfológica por fechamento para suprimir as estruturas com baixo contrastes e preservar as bordas das feições. Uma das vantagens dessa operação consiste na simplificação da imagem enquanto preserva as bordas das estruturas (SALEMBIER; SERRA, 1995). O fechamento ϕ pela reconstrução R do tamanho B de uma imagem f ($\phi_R^{(B)}$) é definida como a reconstrução pela erosão ε de f a partir da dilatação δ de tamanho B de f (Eq. 3) (SOILLE, 2004):

$$\phi_R^{(B)}(f) = R_f^\varepsilon[\delta^{(B)}(f)]. \quad (3)$$

Os efeitos do pré-processamento podem ser verificados na Figura 2, a qual exemplifica uma imagem de entrada, os efeitos da técnica *toggle contrast mappings* sobre a imagem de entrada, o resultado do gradiente morfológico por dilatação e erosão, bem como os efeitos da reconstrução por fechamento.

Figura 2 – Pré-processamento de imagens HRSC: (a) imagem de entrada, (b) efeitos da aplicação da técnica *toggle contrast mappings*, (c) resultado do gradiente morfológico e (d) efeitos da reconstrução por fechamento.



Fonte: Os autores (2020).

3.2 Detecção e delineamento das candidatas a crateras de impacto

A detecção e o delineamento das estruturas candidatas a crateras de impacto, realizados automaticamente e simultaneamente, tiveram início a partir da segmentação de imagens pela transformação *watershed*. Segundo Beucher e Meyer (1992), a transformação *watershed* WS de uma imagem f é definida como as linhas divisórias ou esqueletos das zonas de influência $SKIZ$ de seus mínimos MIN (Eq. 4):

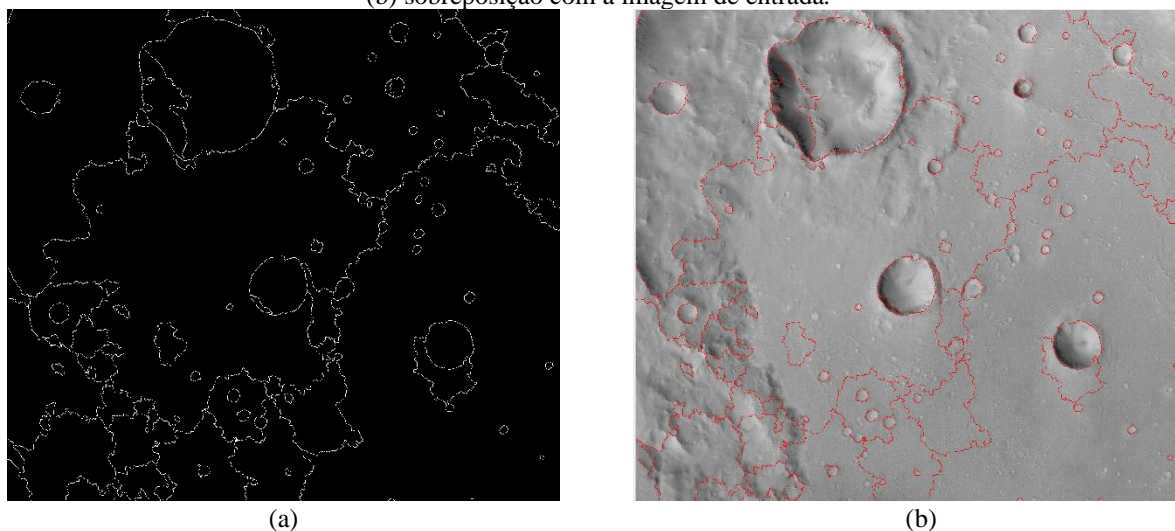
$$WS(f) = SKIZ_f[MIN(f)]. \quad (4)$$

Uma opção adotada para determinar os pontos pelos quais são iniciados os processos na transformação *watershed*, consiste no uso de marcadores (SOILLE, 2004). Sendo assim, foi criado um marcador a partir da função mínimo regional, isto é, um mínimo cuja extensão não é necessariamente restrita a um único pixel da imagem. De acordo com Soille (2004), um mínimo regional de uma imagem f na elevação t , descrito por $(RMIN_t(f))$, consiste em um componente conectado de pixels com valor t , no qual os pixels de limite externos têm um valor estritamente maior que t . Dessa forma, o conjunto de todos os mínimos regionais é denotado por $RMIN$ e definido por um limiar de superposição (Eq. 5):

$$RMIN(f) = R_f^\varepsilon(f + 1) - f. \quad (5)$$

Os efeitos da segmentação de imagens pela transformação *watershed* a partir do marcador gerado com base no mínimo regional são apresentados na Figura 3. Nesta figura é possível verificar também a sobreposição das linhas de *watershed* com as estruturas da imagem de entrada.

Figura 3 – Resultado da segmentação de imagens a partir da transformação *watershed*: (a) linhas de *watershed* geradas e (b) sobreposição com a imagem de entrada.



Fonte: Os autores (2020).

Embora a filtragem pelo mínimo regional tenha promovido a redução do número de bacias geradas na transformação *watershed*, ainda é possível verificar muitas linhas de contornos que não correspondem ao delineamento das estruturas de interesse. Diante disso, após a realização da transformação *watershed* e com o objetivo de mitigar a segmentação excessiva e aprimorar o delineamento das estruturas candidatas a crateras, a fim de manter somente os contornos relevantes, aplicou-se o recurso da dinâmica dos contornos, ou dinâmica da *watershed*. Segundo Najman e Schmitt (1996), a dinâmica dos contornos funciona através de um critério de contraste que mede a diferença de nível de cinza entre um pico e seus mínimos circunvizinhos. Dessa forma, é possível encontrar um padrão no contraste local entre cada contorno e dois mínimos de suas bacias adjacentes.

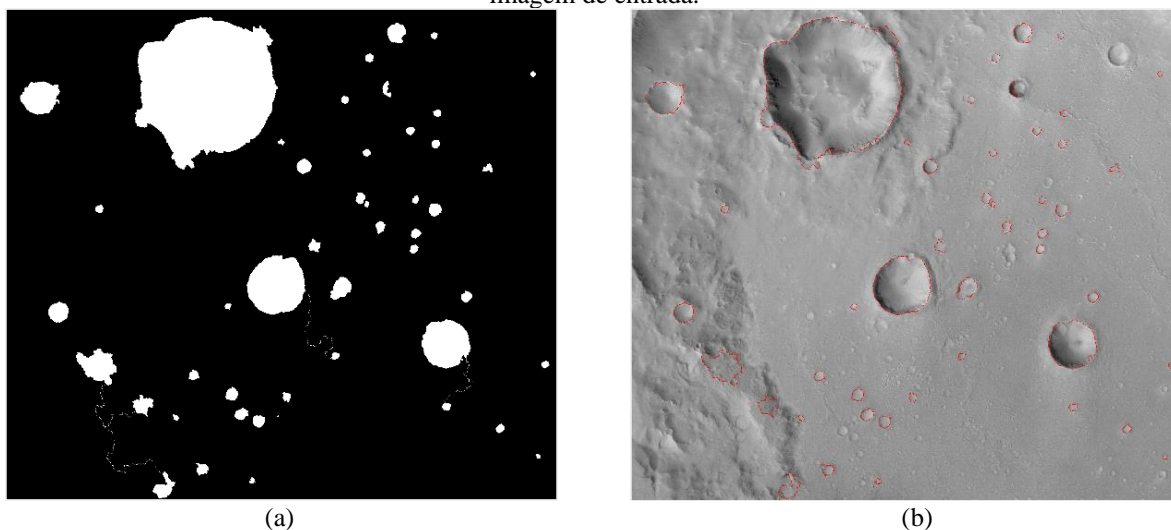
Seja o conjunto de bacias de captação designado por $\{B_i\}$ e um contorno da *watershed* designado por C . Entre o conjunto de x pontos que constituem cada contorno, designa-se aquele com o nível mais baixo por s , sendo o seu valor dado por $I(s) = \min_{x \in C} [I(x)]$. Este ponto s é denominado ponto de sela. Seja $Bas(C)$

o conjunto de pontos das bacias de captação que podem ser alcançados a partir de s , seguindo um caminho com todos os valores menores que $I(s)$ e m_i , seu mínimo, $m_i = \min_{x \in B_i \cap C} [I(x)]$. Com isso, a dinâmica do contorno $dyn(C)$ pode ser obtida através da seguinte expressão (Eq. 6) (NAJMAN; SCHMITT, 1996):

$$dyn(C) = \min[I(S) - m_i]. \quad (6)$$

A $dyn(C)$ tem um intervalo de valores entre 0 e $+\infty$. Cabe ressaltar que para determinar a dinâmica de cada contorno é necessário individualizar cada contorno. A remoção dos vértices das linhas de *watershed* permite obter todos os contornos ou arestas, individualizadas. Além disso, cada contorno possui duas bacias vizinhas, cada uma com um mínimo local. Nesta etapa, os recursos e as estratégias foram utilizados para a identificação dos vértices das linhas de *watershed*, a fim de obter os contornos isolados e, assim, manter os relevantes e remover os que não correspondem ao delineamento de crateras de impacto. Dentre as operações empregadas, destacam-se o espessamento e o afinamento (SOILLE, 2004), os quais garantiram a obtenção dos esqueletos dos contornos de *watershed*. Além disso, para amenizar o efeito de ramificação dos esqueletos, aplicou-se o *prunning* (FACON, 1996). A partir da dinâmica, o resultado foi binarizado e a eliminação das linhas de *watershed* que conectam as estruturas candidatas a crateras de impacto foi realizada. A Figura 4 apresenta o resultado da dinâmica após a binarização, bem como o delineamento das estruturas candidatas a crateras de impacto.

Figura 4 – Resultado da dinâmica: (a) estruturas delineadas e preenchidas e (b) sobreposição dos contornos com a imagem de entrada.



Fonte: Os autores (2020).

3.3 Pós-processamento

Para identificar as estruturas que realmente são crateras, duas condições foram consideradas. A primeira está relacionada ao tamanho, enquanto a segunda condição diz respeito à circularidade das estruturas. Portanto, para eliminar estruturas detectadas, com pequenas dimensões, que não correspondem às crateras, foi utilizado o operador de abertura por área, o qual consiste em um recurso poderoso para filtrar componentes conectados conforme um parâmetro de área. Para isso, utiliza-se de uma análise flexível sobre as zonas planas da imagem (VINCENT, 1994). A abertura por área γ_λ é equivalente à união (ou supremo) de todas as aberturas com elementos estruturantes conectados B , cujo tamanho em número de pixel é igual a λ (Eq. 7) (SOILLE, 2004):

$$\gamma_\lambda = \vee \{\gamma_{B_i}(f)\}. \quad (7)$$

O resultado da filtragem por abertura por área contém todas as regiões conectadas por B_i que possuem área igual ou maior que λ . Dessa forma, a aplicação deste operador considerou dimensões proporcionais aos raios das estruturas de interesse e, portanto, resultou na remoção das estruturas conectadas muito pequenas,

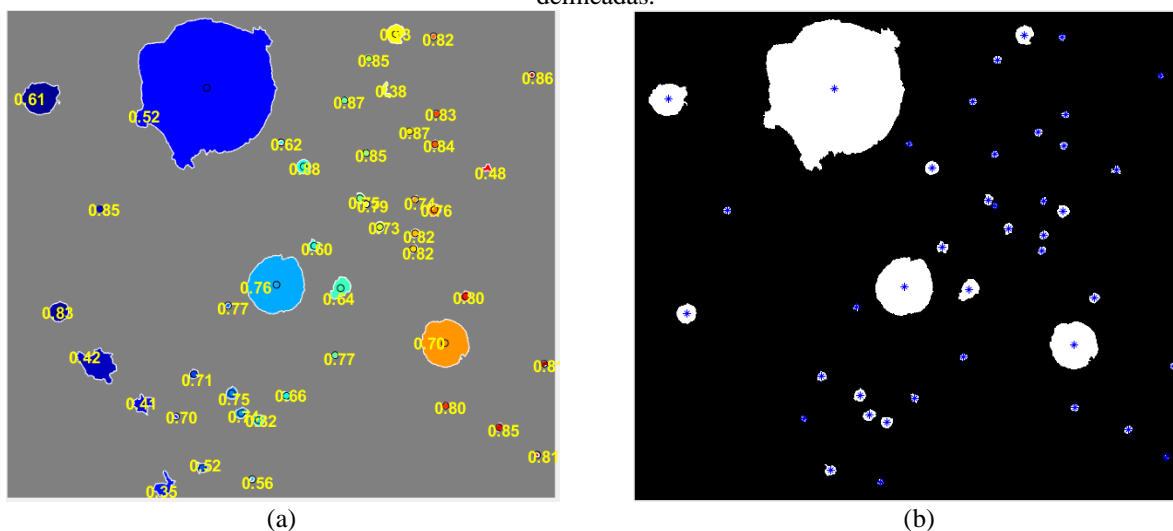
consideradas não candidatas a crateras.

Na sequência, as circularidades das estruturas foram analisadas. Uma vez que as estruturas de interesse apresentam formas aproximadamente circulares, foi calculado para cada estrutura um Índice de Circularidade (*IC*), com o intuito de filtrar feições com formas que não correspondem a crateras. O índice de circularidade foi calculado pela seguinte expressão (Eq. 8):

$$IC = \frac{4 \pi \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \tag{8}$$

As estruturas cujo índice de circularidade permaneceram abaixo de um limiar, igual a 0,5, determinado conforme as características das feições, foram eliminadas do conjunto de estruturas detectadas, pois não constituem fortes candidatas a crateras de impacto. A Figura 5 ilustra o resultado da aplicação do operador de abertura por área e o *IC* para cada estrutura detectada, bem como o resultado após a filtragem.

Figura 5 – Pós-processamento das imagens HRSC: (a) remoção de pequenas estruturas e determinação do índice de circularidade e (b) filtragem pelo *IC* > 0,5, com destaque para a determinação dos centros das estruturas detectadas e delineadas.



Fonte: Os autores (2020).

Ao final, as características das estruturas consideradas crateras de impacto foram extraídas, como as posições do centro (marcadas em azul na Figura 5b) e os raios para cada estrutura, as quais foram armazenadas, para posteriormente, realizar a validação da metodologia por meio da análise de desempenho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o refinamento da metodologia e a extração das características das estruturas, foi efetuada a avaliação do desempenho do processo de detecção e delineamento de crateras. A avaliação do desempenho foi realizada por meio de métricas, quantitativas e qualitativas, baseadas em pixels, propostas por Shufelt (1999), a qual tem sido muito utilizado em pesquisas de detecção de crateras (BANDEIRA; DING; STEPINSKI, 2012; PEDROSA et al.; 2017). Dessa forma, foram consideradas as seguintes métricas: *True Detection Rate (TDR)* ou taxa de detecção verdadeira, *False Detection Rate (FDR)* ou taxa de detecção falsa, *Branching Factor (B)* ou fator de ramificação e *Quality Percentage (Q)* ou percentual de qualidade, as quais são obtidas por meio das Eq. (9), Eq. (10), Eq. (11) e Eq. (12), respectivamente:

$$TDR = \frac{TP}{(TP+FN)} \cdot 100, \tag{9}$$

$$FDR = \frac{FP}{(TP+FP)} \cdot 100, \tag{10}$$

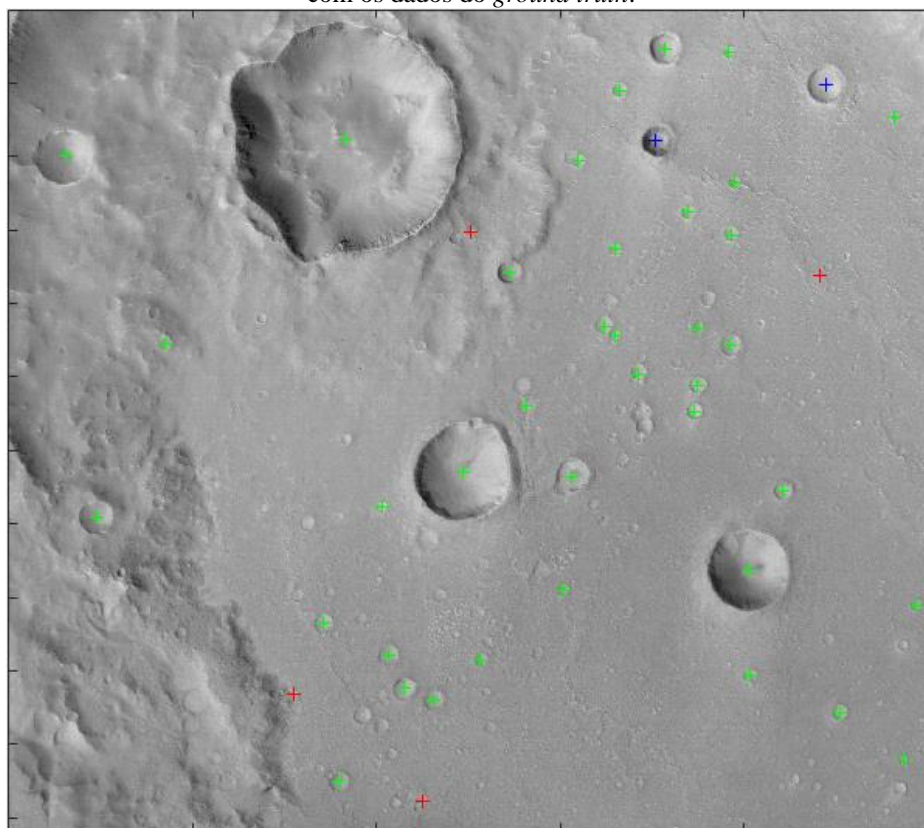
$$B = \frac{FP}{TP}, \quad (11)$$

$$Q = \frac{TP}{(TP + FP + FN)} \cdot 100, \quad (12)$$

em que *TP* (*True Positive* - Verdadeiro Positivo), *FP* (*False Positive* - Falso Positivo) e *FN* (*False Negative* - Falso Negativo) correspondem, respectivamente, ao número de crateras detectadas corretamente, ao número de detecções falsas, e ao número de crateras não detectadas. Cabe ressaltar que para o cálculo de *TP*, *FP* e *FN*, é necessário um conjunto de dados de comparação que represente fielmente as estruturas de interesse. Este conjunto de dados, denominado *ground truth*, foi elaborado para a avaliação do desempenho da metodologia proposta, a partir do *software* ArcGIS 10.2.2 nos seus módulos ArcCatalog e ArcMap e, por meio do aplicativo *Crater Helper* (NAVA, 2011).

Ao final do processamento para cada um dos 85 recortes de imagens HRSC, foi gerada uma imagem com o resultado da detecção e delimitação das crateras de impacto com base no *ground truth*. A Figura 6 exemplifica o resultado, em que os centros das estruturas identificados com uma cruz verde indicam as detecções verdadeiras, os centros com uma cruz vermelha indicam as detecções falsas, enquanto os centros com uma cruz azul representam as crateras que pertencem ao *ground truth*, mas que não foram detectadas. Para realizar a avaliação do desempenho, nas imagens HRSC, foram consideradas crateras de impacto com raio entre 500 e 1000 metros.

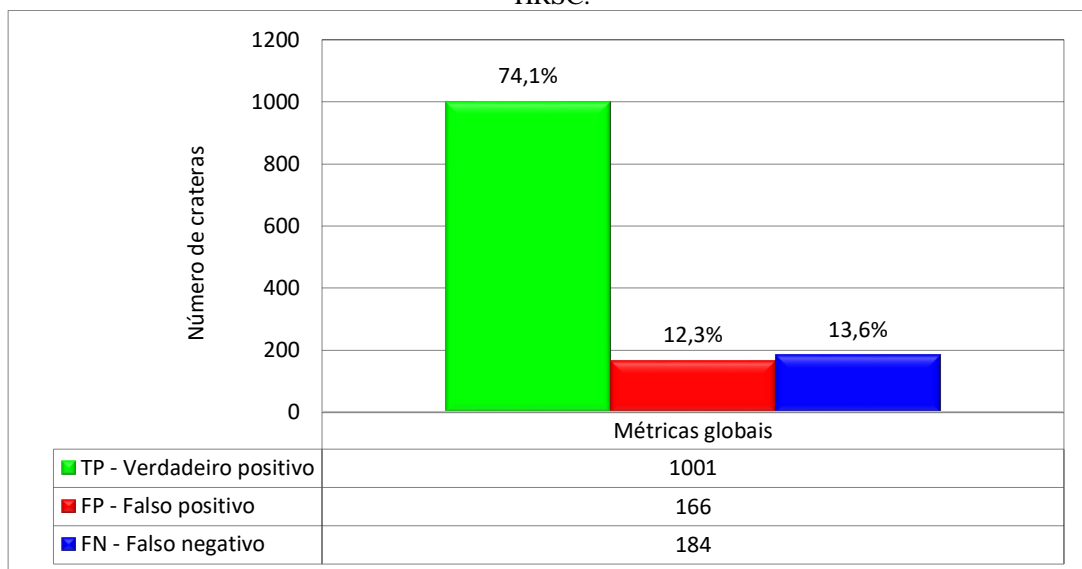
Figura 6 – Resultado da detecção e delimitação de crateras de impacto em imagens HRSC com base na comparação com os dados do *ground truth*.



Fonte: Os autores (2020).

Além da representação visual obtida para as imagens HRSC, contendo as crateras de impacto que foram detectadas corretamente (ou *True Positive* - *TP*), as estruturas que foram detectadas erroneamente (ou *False Positive* - *FP*) e as crateras não detectadas (ou *False Negative* - *FN*), as métricas globais (*TP*, *FP* e *FN*) para todos os 85 recortes de imagens, também foram calculadas. A Figura 7 apresenta as métricas globais de *TP*, *FP* e *FN*, considerando todo o conjunto de imagens HRSC.

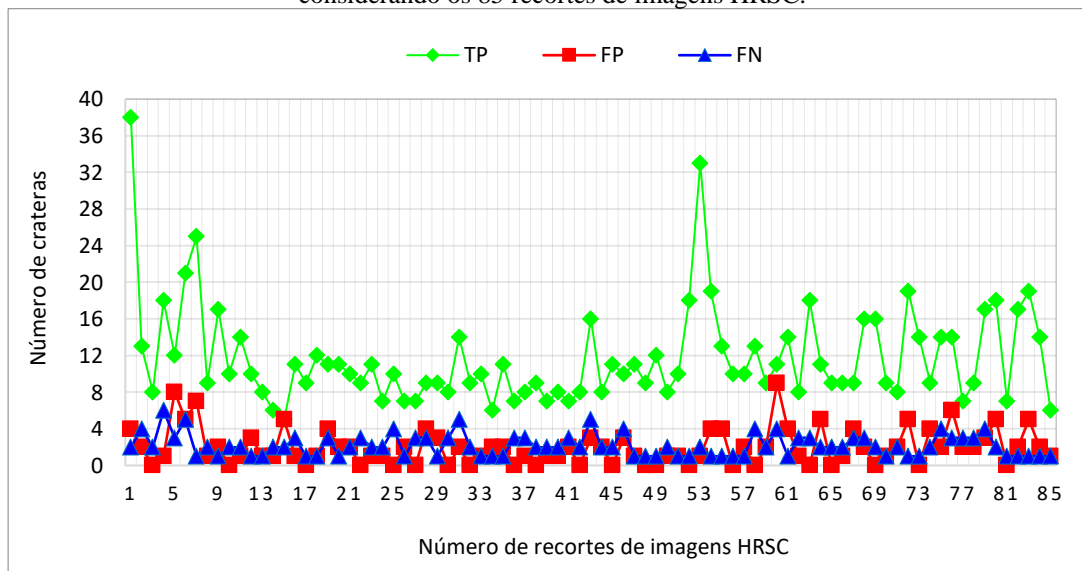
Figura 7 – Métricas globais de verdadeiro positivo (*TP*), falso positivo (*FP*) e falso negativo (*FN*) para as imagens HRSC.



Fonte: Os autores (2020).

Conforme apresentado na Figura 7, o conjunto composto por 85 recortes de imagens HRSC, a partir das análises e comparação com os dados do *ground truth*, apresentou um total de 1001 crateras detectadas corretamente (*TP*), 166 estruturas detectadas incorretamente (*FP*) e 184 crateras de impacto não foram detectadas (*FN*). Além dos valores absolutos apresentados, é possível verificar e analisar o comportamento e a variabilidade das métricas (*TP*, *FP* e *FN*), considerando os 85 recortes de imagens HRSC, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Comportamento das métricas de verdadeiro positivo (*TP*), falso positivo (*FP*) e falso negativo (*FN*), considerando os 85 recortes de imagens HRSC.

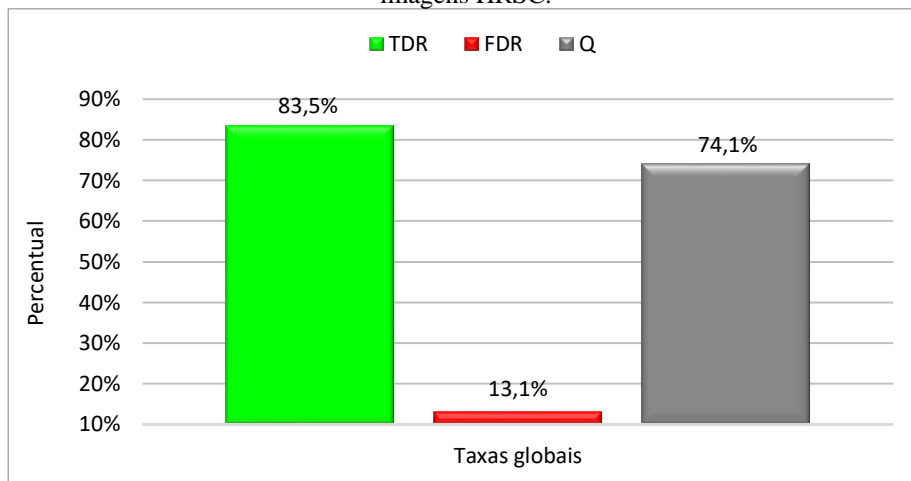


Fonte: Os autores (2020).

A partir dos resultados, apresentados na Figura 8, verifica-se que para a maioria dos recortes de imagens HRSC, a métrica de verdadeiro positivo (*TP*) se comportou na faixa entre 8 e 20 detecções, com algumas exceções para mais, como no caso dos recortes 1 (38 detecções), 7 (25 detecções) e 53 (33 detecções), e para menos, como no caso dos recortes 15 (5 detecções), 34 (6 detecções) e 85 (6 detecções). Em relação às métricas de falso positivo (*FP*), as quantidades se mantiveram, em sua maioria, na faixa entre 0 e 4 detecções incorretas, com algumas exceções para mais, como no caso dos recortes 5 (8 detecções), 7 (7 detecções), 60 (9 detecções) e 76 (6 detecções). Quanto às métricas de falso negativo (*FN*), as quantidades se mantiveram, na

maioria dos casos, na faixa entre 2 e 5 crateras de impacto não detectadas. O cálculo das métricas *TP*, *FP* e *FN* para cada um dos 85 recortes de imagens também permitiu a determinação das taxas de detecção verdadeira (ou *True Detection Rate* - *TDR*), de detecção falsa (*False Detection Rate* - *FDR*), bem como do fator de ramificação (ou *Branching Factor* - *B*) e do percentual de qualidade (ou *Quality Percentage* - *Q*). A Figura 9 mostra as taxas globais de *TDR*, *FDR*, bem como o percentual *Q* para as imagens HRSC.

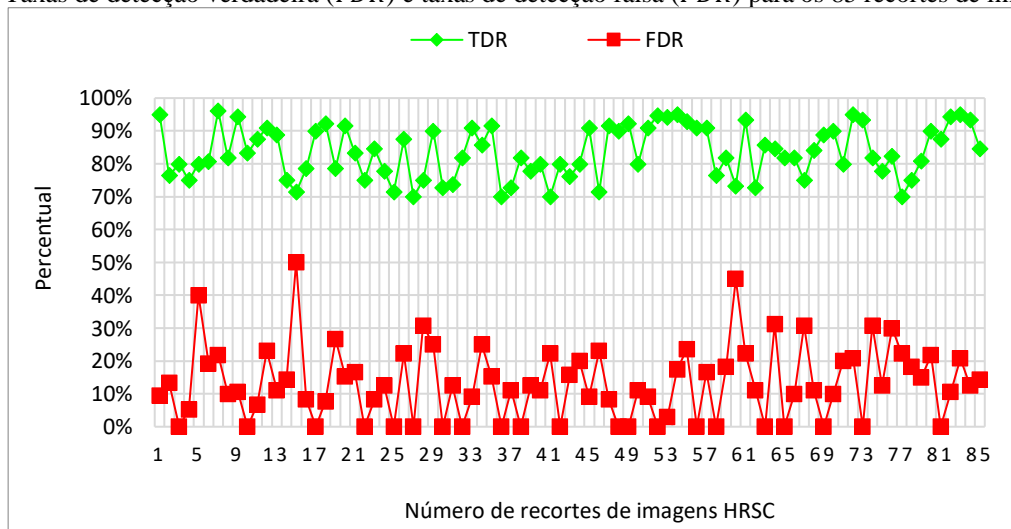
Figura 9 – Taxas globais de detecção verdadeira (*TDR*), detecção falsa (*FDR*) e percentual de qualidade (*Q*) para as imagens HRSC.



Fonte: Os autores (2020).

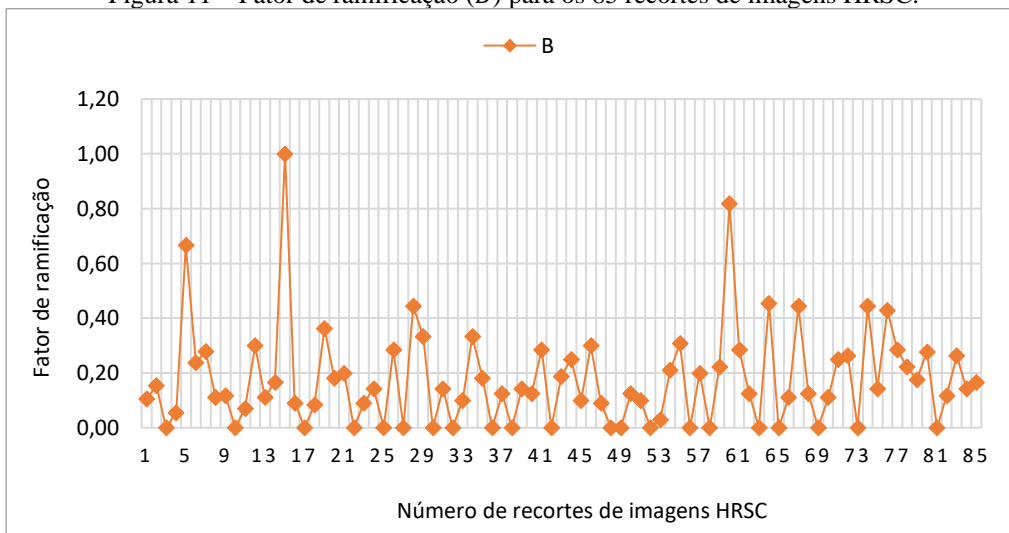
Como pode ser verificado na Figura 9, obteve-se uma taxa de eficiência compatível a 83,5% na detecção de crateras de impacto (*TDR*) com raios entre 500 e 1000 metros. Além disso, a taxa de detecção falsa (*FDR*) é baixa, sendo igual a 13,1%, e o percentual de qualidade (*Q*), em função das taxas anteriores, foi igual a 74,1%. Com o intuito de verificar e analisar o comportamento e a variabilidade da taxa de detecção verdadeira (*TDR*), da taxa de detecção falsa (*FDR*), do fator de ramificação (*B*) e do percentual de qualidade (*Q*), considerando cada um dos 85 recortes de imagens HRSC, foram elaborados gráficos, apresentados nas figuras a seguir. Sendo assim, a Figura 10 mostra as taxas de *TDR* e de *FDR*; a Figura 11 apresenta o fator de ramificação *B*; a Figura 12 apresenta as taxas de *TDR* e o percentual de qualidade *Q*, enquanto a Figura 13 mostra, simultaneamente, as taxas de *TDR*, de *FDR* e o percentual de qualidade *Q*.

Figura 10 – Taxas de detecção verdadeira (*TDR*) e taxas de detecção falsa (*FDR*) para os 85 recortes de imagens HRSC.



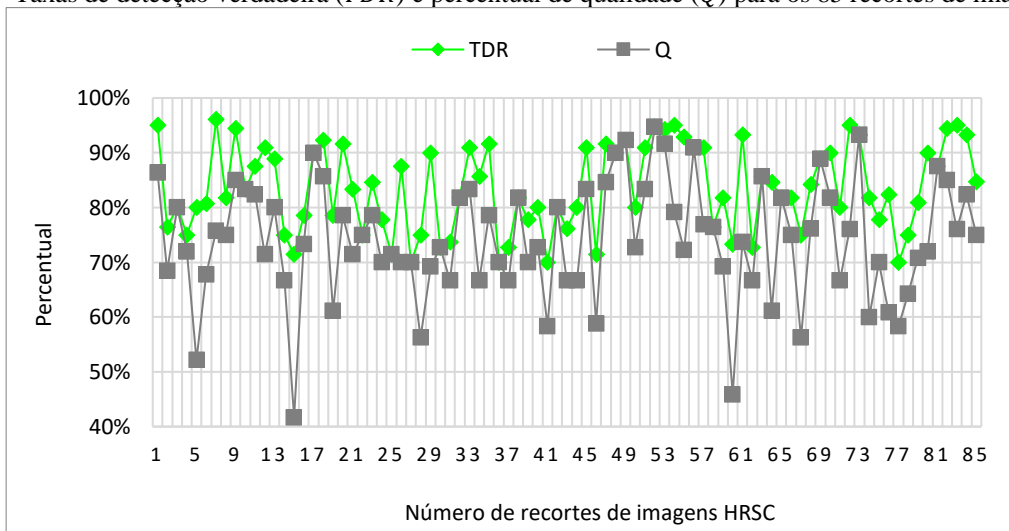
Fonte: Os autores (2020).

Figura 11 – Fator de ramificação (B) para os 85 recortes de imagens HRSC.



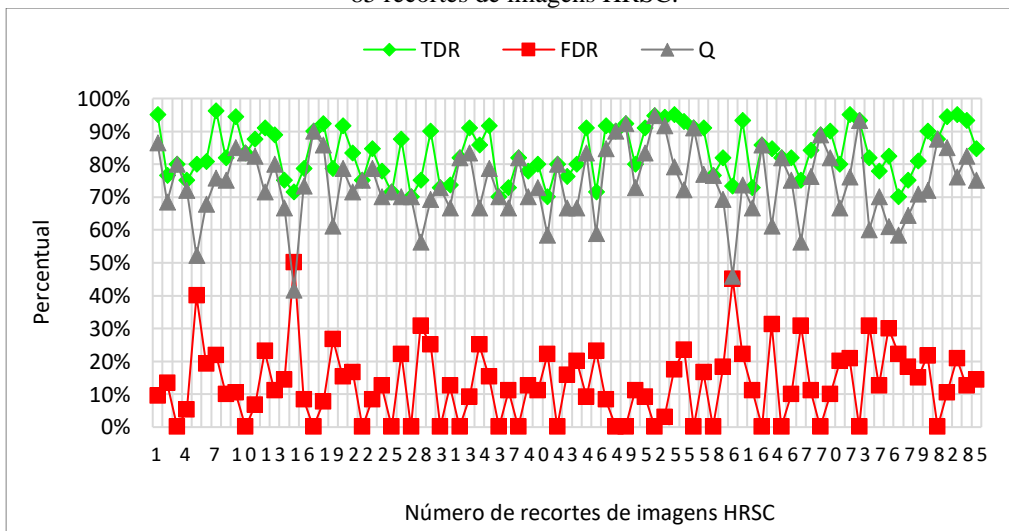
Fonte: Os autores (2020).

Figura 12 – Taxas de detecção verdadeira (TDR) e percentual de qualidade (Q) para os 85 recortes de imagens HRSC.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 13 – Taxas de detecção verdadeira (TDR), taxas de detecção falsa (FDR) e percentual de qualidade (Q) para os 85 recortes de imagens HRSC.



Fonte: Os autores (2020).

Conforme mostra a Figura 10, as taxas de detecção verdadeira (*TDR*), para a maioria dos recortes de imagens, se mantiveram no intervalo entre 70% e 96%, aproximadamente. No caso das taxas de detecção falsa (*FDR*), a maioria dos recortes apresentaram taxas entre 0% e 30%. Algumas exceções, como os recortes 5, 15 e 60, apresentaram taxas (*FDR*) de 40%, 50% e 45%, respectivamente. Como consequência das taxas de *FDR*, nota-se na Figura 11, os baixos valores para o fator de ramificação (*B*). Ao visualizar a Figura 12, por exemplo, é possível verificar que as taxas de detecção verdadeira (*TDR*) e o percentual de qualidade (*Q*), para a maioria dos recortes de imagens, se mantiveram em intervalos aproximadamente semelhantes, entre 70% e 94%. No entanto, há algumas exceções, como por exemplo, os recortes 5, 15 e 50 apresentaram altas taxas de detecção falsa (*FDR*), o que reflete direta e negativamente no percentual de qualidade (*Q*). Tais comportamentos podem ser melhores observadas na Figura 13, sendo possível visualizar e analisar a relação entre a degradação do percentual de qualidade (*Q*) em função do aumento da taxa de detecção falsa (*FDR*), mesmo em casos onde a taxa de detecção verdadeira (*TDR*) se comportou de forma muito eficiente.

5 CONCLUSÕES

A partir dos estudos sobre as diversas abordagens de detecção automática de crateras de impacto na superfície de Marte, conclui-se que o processo de detecção lida com muitas dificuldades e problemas, o que o caracteriza como uma difícil tarefa. Por outro lado, essas estruturas denominadas crateras de impacto possuem características muito peculiares, as quais despertam nos pesquisadores variadas motivações no que se refere às possibilidades de aplicação do processamento de imagens na busca de um algoritmo robusto e eficiente para detectar crateras de impacto reais, quanto à forma e demais propriedades. Cuidados como esses garantem as suas caracterizações completas, as quais são importantes tanto para a área do sensoriamento remoto aplicado às ciências planetárias quanto para as investigações em relação à geologia e geomorfologia do planeta.

A superfície de Marte tem sido observada por meio de diversas missões enviadas ao espaço, as quais adquirem imagens e dados cada vez mais ricos em detalhes e mais abundantes, permitindo a realização do monitoramento e do mapeamento dessa superfície tão importante para a ciência. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver uma metodologia para detectar e delinear, automática e simultaneamente, crateras subquilométricas em imagens de alta resolução espacial da superfície de Marte. A metodologia, fundamentada nos princípios da morfologia matemática e que recorre às mais variadas técnicas e recursos do processamento de imagens, evidencia que há alternativas válidas para essa finalidade, além das abordagens mais recentes baseadas em *machine learning*, *deep learning* e redes neurais convolucionais.

Os experimentos realizados com as imagens HRSC apontam para uma detecção e um delineamento eficientes para 1001 crateras, tendo-se uma taxa de detecção correta de 83,5%. Por outro lado, 166 estruturas presentes nas cenas foram identificadas como crateras incorretamente, o que refletiu em uma taxa de detecção falsa igual a 13,1%. No que se refere às crateras de impacto presentes no *ground truth* mas que não foram detectadas, obteve-se um total de 184. A partir disso, a estimativa do percentual de qualidade foi de 74,1%. Quanto à avaliação do desempenho, o que limitou a quantidade de imagens no processamento foi a elaboração do *ground truth*, que consiste em uma tarefa necessária, porém trabalhosa e que demanda muito tempo por parte do operador. Por outro lado, a construção dessa base de dados, também é considerada uma contribuição da presente pesquisa e, poderá auxiliar na proposição de novas metodologias, para futuramente, ser possível efetuar a comparação entre diferentes abordagens de detecção de crateras de impacto na superfície de Marte, para a região de estudo considerada.

Por fim, ressalta-se que além da metodologia ter apresentado uma taxa de detecção correta relevante, destaca-se a baixa taxa de detecção falsa. Assim, conclui-se que a presente abordagem se apresentou de forma eficiente e, portanto, pode contribuir para a solução de um problema atual no contexto da detecção e extração de crateras em superfícies planetárias e, até mesmo, em soluções voltadas para pesquisas de detecção de outras feições presentes nos corpos rochosos do sistema solar.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001, pelo apoio financeiro em parte do desenvolvimento da pesquisa.

Contribuição dos Autores

R.F. de Oliveira e E. A. da Silva atuaram conjuntamente nas etapas de conceptualização, investigação, metodologia, validação, visualização, revisão e edição; R.F. de Oliveira foi responsável pela curadoria dos dados; E. A. da Silva executou a supervisão; R.F. de Oliveira e E. A. da Silva atuaram na análise formal; E. A. da Silva foi o responsável pela administração do projeto.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- BANDEIRA, L.; DING, W.; STEPINSKI, T. F. Detection of sub-kilometer craters in high resolution planetary images using shape and texture features. **Advances in Space Research**, vol. 49, n. 1, p. 64-74, Jan. 2012. DOI. 10.1016/j.asr.2011.08.021.
- BANDEIRA, L.; MARQUES, J. S.; SARAIVA, J.; PINA, P. Automated detection of Martian dune fields. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, vol. 8, n. 4, p. 626-630, Jan. 2011. DOI. 10.1109/LGRS.2010.2098390
- BEUCHER, S.; MEYER, F. **The Morphological Approach to Segmentation: The Watershed Transformation**. Optical Engineering-New York-Marcel Dekker Incorporated: New York, USA, vol. 34. p. 433-433, 1992.
- CHICARRO, A.; MARTIN, P.; TRAUTNER, R. The Mars Express mission: an overview. In: **Mars Express: The Scientific Payload**, 2004. p. 3-13.
- CRATER ANALYSIS TECHNIQUES WORKING GROUP. Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data. **Icarus**, vol. 37, n. 2, p. 467-474, Feb. 1979. DOI. 10.1016/0019-1035(79)90009-5.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **HRSC webGIS @ FU-Berlin Planetary Sciences** (FUB/DLR/ESA), 2018. Disponível em: <<http://maps.planet.fu-berlin.de/>>. Acesso em 10 Jun. 2018.
- FACON, J. **Morfologia Matemática: teoria e exemplos**. Editora Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 1996.
- GWINNER, K.; SCHOLTEN, F.; PREUSKER, F.; ELGNER, S.; ROATSCH, T.; SPIEGEL, M.; HEIPKE, C. Topography of Mars from global mapping by HRSC high-resolution digital terrain models and orthoimages: Characteristics and performance. **Earth and Planetary Science Letters**, vol. 294, n. 3, p. 506-519, Jun 2010. DOI. 10.1016/j.epsl.2009.11.007.
- HARTMANN, W. K.; NEUKUM, G. Cratering chronology and the evolution of Mars. **Space Science Reviews**, vol. 96, p. 165-194, Apr. 2001. DOI. 10.1023/A:1011945222010.
- JAUMANN, R.; NEUKUM, G.; BEHNKE, T.; DUXBURY, T. C.; EICHENTOPF, K.; FLOHRER, J.; HOFFMANN, H. The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission. **Planetary and Space Science**, vol. 55, n. 7, p. 928-952, May 2007. DOI. 10.1016/j.pss.2006.12.003.
- KIM, J. R.; MULLER, J. P.; VAN GASSELT, S.; MORLEY, J. G.; NEUKUM, G. Automated crater detection, a new tool for Mars cartography and chronology. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**,

- vol. 71, n. 10, p. 1205-1217, Oct. 2005. DOI. 10.14358/PERS.71.10.1205.
- MALIN, M. C.; DANIELSON, G. E.; INGERSOLL, A. P.; MASURSKY, H.; VEVERKA, J.; RAVINE, M. A.; SOULANILLE, T. A. Mars observer camera. **Journal of Geophysical Research: Planets**, vol. 97, n. E5, p. 7699-7718, May 1992. DOI. 10.1029/92JE00340.
- MARQUES, J. S.; PINA, P. Crater delineation by dynamic programming. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, vol. 12, n. 7, p. 1581-1585, Apr. 2015. DOI. 10.1109/LGRS.2015.2413753.
- MINITTI, M. E.; MALIN, M. C.; VAN BEEK, J. K.; CAPLINGER, M.; MAKI, J. N.; RAVINE, M.; CALEF III, F. J.; EDGAR, L. A.; HARKER, D.; HERKENHOFF, K. E.; KAH, L. C.; KENNEDY, M. R.; KREZOSKI, G. M.; KRONYAK, R. E.; LIPKAMAN, L.; NIXON, B.; ROWLAND, S. K.; SCHIEBER, J.; SCHOREDER, J. F.; STACK, K. M.; WILLIAMS, R. M. E.; YINGST, R. A. Distribution of primary and secondary features in the Pahrump Hills outcrop (Gale crater, Mars) as seen in a Mars Descent Imager (MARDI)“sidewalk” mosaic. **Icarus**, vol. 328, p. 194-209, Aug 2019. DOI. 10.1016/j.icarus.2019.03.005.
- NAJMAN, L.; SCHMITT, M. Geodesic saliency of watershed contours and hierarchical segmentation. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, vol. 18, n. 12, p. 1163-1173, Dec. 1996. DOI. 10.1109/34.546254.
- NAVA, R. A. **Crater Helper Tools for ArcGIS 10.0**. United States Geological Survey, Flagstaff, Arizona, Astrogeology Science Center, p. 1-13, Jun 2011.
- PALAFOX, L. F.; HAMILTON, C. W.; SCHEIDT, S. P.; ALVAREZ, A. M. Automated Detection of Geological Landforms on Mars using Convolutional Neural Networks. **Computers & Geosciences**, vol. 101, p. 48-56, Apr. 2017. DOI. 10.1016/j.cageo.2016.12.015.
- PEDROSA, M. M.; AZEVEDO, S. C.; SILVA, E. A.; DIAS, M. A. Improved automatic impact crater detection on Mars based on morphological image processing and template matching. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, vol. 8, n. 2, p. 1306-1319, May 2017. DOI. 10.1080/19475705.2017.1327463.
- RAPIN, W.; CHAUVIRÉ, B.; GABRIEL, T. S. J.; MCADAM, A. C.; EHLMANN, B. L.; HARDGROVE, C.; MESLIN, P. Y.; RONDEAU, B.; DEHOUCK, E.; FRANZ, H. B.; MANGOLD, N.; CHIPERA, S. J.; WIENS, R. C.; FRYDENVANG, J.; SCHRODER, S. In situ analysis of opal in Gale crater, Mars. **Journal of Geophysical Research: Planets**, vol. 123, n. 8, p. 1955-1972, July 2018. DOI. 10.1029/2017JE005483.
- ROBBINS, S. J.; HYNEK, B. M. A new global database of Mars impact craters ≥ 1 km: 1. Database creation, properties, and parameters. **Journal of Geophysical Research: Planets**, vol. 117, n. E5, May 2012. DOI. 10.1029/2011JE003967.
- RODIONOVA, J. F.; DEKCHTYAREVA, K. I.; KHRAMCHIKHIN, A. A.; MICHAEL, G. G.; AJUKOV, S. V.; PUGACHEVA, S. G.; SHEVCHENKO, V. V. **Morphological catalogue of the craters of Mars**. Technical report, European Space Agency, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2000.
- SALAMUNIĆCAR, G.; LONČARIĆ, S.; PINA, P.; BANDEIRA, L.; SARAIVA, J. MA130301GT catalogue of Martian impact craters and advanced evaluation of crater detection algorithms using diverse topography and image datasets. **Planetary and Space Science**, vol. 59, n. 1, p. 111-131, Jan. 2011. DOI. 10.1016/j.pss.2010.11.003.
- SALEMBIER, P.; SERRA, J. Flat zones filtering, connected operators, and filters by reconstruction. **IEEE Transactions on image processing**, vol. 4, n. 8, p. 1153-1160, Aug. 1995. DOI. 10.1109/83.403422.
- SCHOLTEN, F.; GWINNER, K.; ROATSCH, T.; MATZ, K. D.; WÄHLISCH, M.; GIESE, B.; NEUKUM, G. Mars Express HRSC data processing - Methods and operational aspects. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 71, n 10, p 1143-1152, Oct 2005. DOI. 10.14358/PERS.71.10.1143.
- SERRA, J. Toggle mappings. In **From Pixels to Features**; Elsevier: North Holland, The Netherlands, 1989; p. 61-72.
- SHUFELT, J. A. Performance evaluation and analysis of monocular building extraction from aerial imagery. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. 21, n. 4, p. 311-326, Apr. 1999. DOI. 10.1109/34.761262.

- SODERBLOM, L. A.; CONDIT, C. D.; WEST, R. A.; HERMAN, B. M.; KREIDLER, T. J. Martian planetwide crater distributions: Implications for geologic history and surface processes. **Icarus**, vol. 22, n. 3, p. 239-263, July 1974. DOI. 10.1016/0019-1035(74)90175-4.
- SOILLE, P. **Morphological image analysis: principles and applications**. Berlin. Springer-Verlag, 2004.
- STATELLA, T.; PINA, P.; SILVA, E. A. Image processing algorithm for the identification of Martian dust devil tracks in MOC and HiRISE images. **Planetary and Space Science**, vol. 70, n. 1, p. 46-58, Sept. 2012. DOI. 10.1016/j.pss.2012.06.003.
- SWEENEY, J.; WARNER, N. H.; GANTI, V.; GOLOMBEK, M. P.; LAMB, M. P.; FERGASON, R.; KIRK, R. Degradation of 100-m-Scale Rocky Ejecta Craters at the InSight Landing Site on Mars and Implications for Surface Processes and Erosion Rates in the Hesperian and Amazonian. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 123, n. 10, p. 2732-2759, Oct. 2018. DOI. 10.1029/2018JE005618.
- TANAKA, K. L.; SKINNER JR, J. A.; DOHM, J. M.; IRWIN III, R. P.; KOLB, E. J.; FORTEZZO, C. M.; PLATZ, T.; MICHAEL, G. G.; HARE, T. M. **Geologic map of Mars**, United States Geological Survey, Scientific Investigations Map 3292, 2014. Scale 1:20,000,000. DOI. 10.3133/sim3292.
- TANAKA, K. L. The stratigraphy of Mars. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, vol. 91, n. B13, p. E139-E158, Nov. 1986. DOI. 10.1029/JB091iB13p0E139.
- THOMSON, B. J.; BRIDGES, N. T.; MILLIKEN, R.; BALDRIDGE, A.; HOOK, S. J.; CROWLEY, J. K.; MARION, G. M.; SOUZA FILHO, C. R.; BROWN, A. J.; WEITZ, C. M. Constraints on the origin and evolution of the layered mound in Gale Crater, Mars using Mars Reconnaissance Orbiter data. **Icarus**, vol. 214, n. 2, p. 413-432, Aug. 2011. DOI. 10.1016/j.icarus.2011.05.002.
- URBACH, E. R.; STEPINSKI, T. F. Automatic detection of sub-km craters in high resolution planetary images. **Planetary and Space Science**, v. 57, n. 7, p 880-887, June 2009. DOI. 10.1016/j.pss.2009.03.009.
- VINCENT, L. Morphological area openings and closings for grey-scale images. In: O YL.; TOET, A.; FOSTER, D.; HEIJMANS H., J., A., M.; MEER P. (Eds) **Shape in Picture**. NATO ASI Series (Series F: Computer and Systems Sciences), vol 126. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994, p. 197-208.
- WARDLAW, J.; SPRINKS, J.; HOUGHTON, R.; MULLER, J. P.; SIDIROPOULOS, P.; BAMFORD, S.; MARSH, S. Comparing experts and novices in Martian surface feature change detection and identification. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, vol. 64, p. 354-364, Feb. 2017. DOI. 10.1016/j.jag.2017.05.014.
- WERNER, S. C. Moon, Mars, Mercury: Basin formation ages and implications for the maximum surface age and the migration of gaseous planets. **Earth and Planetary Science Letters**, vol. 400, p. 54-65, Aug. 2014. DOI. 10.1016/j.epsl.2014.05.019.
- XIN, X.; DI, K.; WANG, Y.; WAN, W.; YUE, Z. Automated Detection of New Impact Sites on Martian Surface from HiRISE Images. **Advances in Space Research**, vol. 60, n. 7, p. 1557-1569, Oct. 2017. DOI. 10.1016/j.asr.2017.06.044.

Biografia do autor principal



Renan Furlan de Oliveira, Presidente Prudente-SP, 1989. Possui graduação em Engenharia Cartográfica, mestrado e doutorado em Ciências Cartográficas pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (FCT/UNESP), *campus* Presidente Prudente. No doutoramento, realizou estágio de pesquisa com foco no processamento e análise de imagens de sensoriamento remoto aplicado às ciências planetárias no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. Atualmente é docente do Departamento de Engenharia Civil, na área de Ciências Geodésicas, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), *campus* Florianópolis.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.