



**THIAGO STATELLA**

**DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE RASTROS DE DUST  
DEVILS NA SUPERFÍCIE DE MARTE**

**Presidente Prudente**  
**2012**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas**

---

**THIAGO STATELLA**

**DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE RASTROS DE DUST DEVILS  
NA SUPERFÍCIE DE MARTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Presidente Prudente, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Erivaldo Antônio da Silva.  
Coorientador: Prof. Dr. Pedro Miguel Berardo Duarte Pina.

**Presidente Prudente**  
**2012**

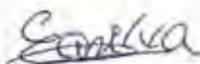
## FICHA CATALOGRÁFICA

S799d Statella, Thiago.  
Detecção Automática de Rastros de Dust Devils na Superfície de Marte /  
Thiago Statella. - Presidente Prudente : [s.n], 2012  
203 f. : il.

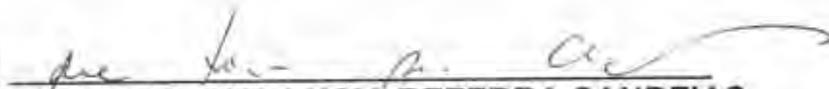
Orientador: Erivaldo Antônio da Silva  
Coorientador: Pedro Miguel Berardo Duarte Pina  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências e Tecnologia  
Inclui bibliografia

1. Morfologia matemática. 2. Dust Devils. 3. Detecção automática de  
feições. I. Silva, Erivaldo Antônio. II. Pina, Pedro Miguel Berardo Duarte. III.  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV.  
Título.

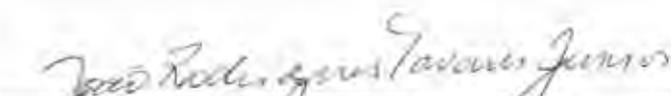
**BANCA EXAMINADORA**



PROF. DR. **ERIVALDO ANTONIO DA SILVA**  
ORIENTADOR



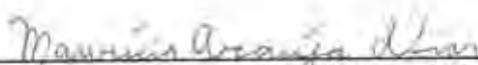
PROFA. DRA. **ANA LUCIA BEZERRA CANDEIAS**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO



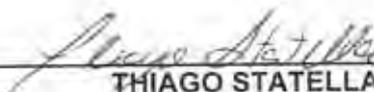
PROF. DR. **JOÃO RODRIGUES TAVARES JUNIOR**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO



PROF. DR. **JOSE ROBERTO NOGUEIRA**  
FCT/UNESP



PROF. DR. **MAURÍCIO ARAUJO DIAS**  
FCT/UNESP



**THIAGO STATELLA**

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 17 DE MAIO DE 2012

RESULTADO: APROVADO

Aos meus pais, Lourdes Martins Statella  
e José Luiz Statella, dedico o resultado  
de todo o meu esforço durante a  
realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Registro aqui a minha mais sincera gratidão a todos que me ajudaram durante a elaboração deste trabalho, direta ou indiretamente. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT) pela concessão do afastamento para doutorado. Ao Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL) que me acolheu em estágio de doutorado em Portugal. Aos professores Eivaldo Antônio da Silva e Pedro Miguel Berardo Duarte Pina que me orientaram no doutorado. Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da FCT-UNESP. À seção de pós graduação da FCT-UNESP. E um especial agradecimento à minha família, pelo apoio e compreensão ao longo destes anos.

"Há dois tipos de sabedoria: a inferior e a superior. A sabedoria inferior é medida por quanto uma pessoa sabe, e a superior, pela consciência que ela tem do que não sabe".

Augusto Cury.

## RESUMO

*Dust Devils* são vórtices convectivos formados por correntes de ar quente instáveis, próximas à superfície planetária. Inúmeros pesquisadores têm estudado *dust devils* marcianos na tentativa de melhor entender o fenômeno. Em geral, as áreas de pesquisa compreendem a simulação numérica e mecânica de *dust devils* em laboratório, metodologias para reconhecimento de vórtices por robôs pousados na superfície de Marte e a detecção de vórtices e rastros em imagens orbitais. Apesar do grande número de artigos relacionados ao assunto, nenhum deles aborda a detecção automática de rastros de *dust devils*, tarefa que ganha especial importância quando a quantidade de imagens da superfície de Marte cresce a uma taxa maior que a capacidade humana de analisá-las em um curto período de tempo. Esta Tese descreve um método inédito para detecção automática de rastros de *dust devils*. O banco de imagens utilizado contém 200 imagens (90 MOC e 110 HiRISE), distribuídas pelas regiões Aeolis, Noachis, Argyre, Eridania e Hellas. O método é fortemente baseado na Morfologia Matemática e usa transformações como abertura e fechamento por área morfológicos, fechamento por caminho morfológico, método de Otsu para binarização automática de imagens, dentre outras. O método foi aplicado às 200 imagens do banco e os resultados foram comparados com imagens de referência em que os rastros foram marcados manualmente. A acurácia global média do conjunto todo foi  $\sim 92\% \pm \sim 5\%$ . A acurácia não foi afetada pela variação em resolução espacial das imagens (0,25 m ou 0,50 m para as imagens HiRISE e de 1,43 m a 8,75 m para as MOC) e não apresenta correlação com a latitude ou longitude solar, a qual desempenha um papel importante na variação de brilho das feições durante o ano marciano. Além disso, o método é eficaz mesmo na presença de crateras, um dos tipos mais comuns de feições geomorfológicas presentes na superfície do planeta. Após a detecção dos rastros, são dados alguns exemplos de como utilizar as imagens binárias para calcular características dos *dust devils*, tais como área coberta por rastros, contraste relativo entre rastros e as regiões vizinhas, largura média e direção preponderante dos rastros.

**Palavras-chave:** Detecção automática de feições, *Dust devils*, Marte, Morfologia Matemática, Sensoriamento Remoto, Processamento Digital de Imagens.

## ABSTRACT

Dust devils are vortices caused by unstable wind convection processes near the planetary surfaces, due to solar heat. Many researchers have been studying Martian dust devils in an attempt to better understand the phenomena. Generally, the research fields comprise mechanic and numerical simulation of dust devils in laboratories, methodologies for recognition of dust devils plumes from rovers on Mars surface, detection of plumes and tracks from orbital images. Despite the number of papers regarding the subject, none of them addresses the automatic detection of dust devil tracks which is an important issue as the amount of images taken grows at a rate greater than the human capability to analyze them. This Thesis describes a novel method to detect Martian dust devil tracks automatically. The dataset comprises 200 images (90 MOC and 110 HiRISE), distributed over the regions of Aeolis, Noachis, Argyre, Eridania and Hellas. The method is strongly based on Mathematical Morphology and uses transformations such as morphological surface area closing and opening, morphological path closing and Otsu's method for automatic image binarization, among others. The method was applied to the dataset and results were compared to ground truth images in which tracks were marked manually. The mean global accuracy for the whole set of images was  $\sim 92\% \pm \sim 5\%$ . The accuracy was not affected by the variation in spatial resolution of the images (HiRISE images were either 0,25 m or 0,50 m and MOC images varied between 1,43 m and 8,75 m) and is not sensitive to changes in latitude and solar longitude, which plays an important role in albedo variation during the Martian year. Besides, the method works even in the presence of craters, one of the most common geomorphologic features on the surface of the planet. Once tracks have been detected, we give examples of how the binary images can be used to compute dust devils characteristics such as area covered by the tracks, relative contrast between tracks and surrounding areas, mean width and prevalent direction of tracks.

**Keywords:** Automatic feature detection, Dust devils, Mars, Mathematical Morphology, Remote Sensing, Digital Image Processing.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Comportamento espectral de alvos.....	36
<b>Figura 2:</b> Sistema de coordenadas de imagem.....	39
<b>Figura 3:</b> Conjuntos e suas respectivas árvores de homotopia.....	44
<b>Figura 4:</b> Histogramas com dois (a) e três (b) picos.....	46
<b>Figura 5:</b> Binarização automática pelo método de Otsu.....	49
<b>Figura 6:</b> Imagem usada para demonstrar o exemplo numérico do método de Otsu.....	49
<b>Figura 7:</b> Imagem gerada somente por uma função de reflectância (a) e seu histograma (b).....	51
<b>Figura 8:</b> Influência da função de iluminação na binarização de imagens.....	52
<b>Figura 9:</b> Noção de conjunto e função para representação de imagens digitais.....	54
<b>Figura 10:</b> Ínfimo e supremo de duas funções $f$ e $g$ .....	56
<b>Figura 11:</b> Efeitos da erosão sobre uma imagem em tons de cinza.....	59
<b>Figura 12:</b> Demonstração numérica do processo de erosão.....	59
<b>Figura 13:</b> Dilatação em tons de cinza: imagem original (a) e dilatada (b).....	60
<b>Figura 14:</b> Demonstração numérica do processo de dilatação.....	60
<b>Figura 15:</b> Preservação de contraste após filtragem morfológica.....	63
<b>Figura 16:</b> Abertura $\gamma$ de um conjunto $X$ por um EE $B$ .....	64
<b>Figura 17:</b> Ilustração do filtro de abertura sobre funções.....	65
<b>Figura 18:</b> Fechamento $\phi$ de um conjunto $X$ por um EE $B$ .....	65
<b>Figura 19:</b> Ilustração do filtro de fechamento sobre funções.....	66
<b>Figura 20:</b> Abertura e fechamento de área de tamanho igual a quinhentos pixels.....	68
<b>Figura 21:</b> Uma linha da imagem $f$ decomposta em suas seções transversais.....	68
<b>Figura 22:</b> Simulação de abertura de área em imagem em tons de cinza.....	69
<b>Figura 23:</b> Simulação de fechamento de área em imagem em tons de cinza.....	70
<b>Figura 24:</b> Simulação de imagem binária.....	71
<b>Figura 25:</b> Exemplo de granulometria por abertura.....	74
<b>Figura 26:</b> Direções dos 8 vizinhos do pixel $p$ .....	75
<b>Figura 27:</b> Imagem binária com feições lineares.....	77
<b>Figura 28:</b> Espectros padrão com EEs nas direções $0^\circ$ , $45^\circ$ , $90^\circ$ e $135^\circ$ .....	77

<b>Figura 29:</b> Rosa de direções para a imagem mostrada na Figura 28.....	78
<b>Figura 30:</b> Grafo de adjacência.....	79
<b>Figura 31:</b> Adjacências nas direções 0° (a), 45° (b), 90° (c) e 135° (d).....	80
<b>Figura 32:</b> Possíveis caminhos na direção 45° (NE-SW).....	80
<b>Figura 33:</b> Exemplo de aplicação de aberturas por caminho.....	81
<b>Figura 34:</b> Exemplo de <i>top-hat</i> por abertura em um sinal unidimensional.....	82
<b>Figura 35:</b> Exemplo de <i>top-hat</i> por fechamento em um sinal unidimensional.....	83
<b>Figura 36:</b> Aplicação de <i>top-hats</i> em imagem em tons de cinza.....	83
<b>Figura 37:</b> Imagem binária criada para exemplificar a aplicação de covariância morfológica.....	84
<b>Figura 38:</b> Covariância morfológica nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.....	85
<b>Figura 39:</b> Derivadas das covariâncias.....	85
<b>Figura 40:</b> Picos das covariâncias.....	86
<b>Figura 41:</b> Exemplo de ajuste da reta tangente à origem da covariância.....	87
<b>Figura 42:</b> Exemplo de ajuste da reta assíntota.....	87
<b>Figura 43:</b> Comparação entre processos de esqueletização.....	92
<b>Figura 44:</b> Aspecto da projeção Sinusoidal.....	97
<b>Figura 45:</b> Indicatriz de Tissot em vários pontos da projeção Sinusoidal.....	97
<b>Figura 46:</b> Aspecto da projeção Equirretangular.....	98
<b>Figura 47:</b> Indicatriz de Tissot para diversos pontos da projeção Equirretangular.....	98
<b>Figura 48:</b> Instrumentos da missão MGS.....	100
<b>Figura 49:</b> Instrumento MOC.....	100
<b>Figura 50:</b> Imagem MOC, câmera grande-angular, canal vermelho.....	101
<b>Figura 51:</b> Instrumentos da missão MRO.....	102
<b>Figura 52:</b> Câmera HiRISE.....	103
<b>Figura 53:</b> Imagem HiRISE.....	103
<b>Figura 54:</b> Formação de <i>dust devils</i> .....	105
<b>Figura 55:</b> Estações do ano marciano definidas em termos de longitude solar Ls.....	107
<b>Figura 56:</b> <i>Dust devils</i> na superfície terrestre.....	107
<b>Figura 57:</b> <i>Dust devils</i> na superfície marciana.....	108
<b>Figura 58:</b> Regiões estudadas.....	111
<b>Figura 59:</b> Distribuição das imagens na superfície de Marte.....	113

<b>Figura 60:</b> Imagem cujos pixels relevantes e de fundo apresentam grande contraste (a) e seu histograma bimodal (b).....	114
<b>Figura 61:</b> Imagem binarizada sobreposta à imagem original (a) e pixels relevantes indicados pela elipse em vermelho em (b).....	114
<b>Figura 62:</b> Imagem pancromática QuickBird (a) e seu histograma (b).....	115
<b>Figura 63:</b> Detecção de pistas da rodovia.....	116
<b>Figura 64:</b> Falha no método de detecção.....	116
<b>Figura 65:</b> Etapas do método de detecção automática de rastros de <i>dust devils</i> .....	117
<b>Figura 66:</b> Comparação entre os limiares de binarização definidos por Otsu e manualmente.....	119
<b>Figura 67:</b> Limiares manuais versus calculados por Otsu.....	120
<b>Figura 68:</b> Limiares manuais versus calculados por Otsu restrito a $[k_{méd}, k_{máx}]$ .....	120
<b>Figura 69:</b> Limiares manuais versus calculados por Otsu restrito a $[k_{méd}, k_{máx}]$ do Laplaciano.....	121
<b>Figura 70:</b> Exemplo de melhoria no desempenho da binarização.....	121
<b>Figura 71:</b> Filtragem.....	124
<b>Figura 72:</b> Fechamento por caminho (a) e <i>top-hat</i> (b).....	125
<b>Figura 73:</b> Binarização.....	126
<b>Figura 74:</b> Imagens HiRISE e MOC relacionadas na Tabela 4.....	127
<b>Figura 75:</b> Detecção de rastros nas imagens mostradas na Figura 75.....	127
<b>Figura 76:</b> Exemplos de desempenho do método.....	128
<b>Figura 77:</b> Detecção de rastros na imagem PSP_003834_1650.....	129
<b>Figura 78:</b> Detecção de rastros na imagem ESP_013992_1170A.....	129
<b>Figura 79:</b> Detecção de rastros na imagem PSP_005659_1335A.....	130
<b>Figura 80:</b> Detecção de rastros na imagem PSP_005659_1335C.....	130
<b>Figura 81:</b> Detecção de rastros na imagem S09-01660A.....	130
<b>Figura 82:</b> Detecção de rastros na imagem ESP_014004_1180.....	131
<b>Figura 83:</b> Exemplos de rastros não marcados (a-f) e marcados (g-l) no <i>ground truth</i> .....	132
<b>Figura 84:</b> <i>Ground truth</i> das imagens mostradas na Figura 75.....	133
<b>Figura 85:</b> Acurácia versus latitude.....	135
<b>Figura 86:</b> Acurácia versus longitude solar.....	135

<b>Figura 87:</b> Variação dos rastros na cratera Russell entre os anos de 2007 a 2011 durante a primavera.....	136
<b>Figura 88:</b> Mudanças nos rastros de <i>dust devils</i> na cratera Russell ao longo de um ano marciano.....	137
<b>Figura 89:</b> Detecção de rastros na região da cratera Russell.....	139
<b>Figura 90:</b> Variação da área coberta por rastros em função da latitude.....	140
<b>Figura 91:</b> Variação da área coberta por rastros em função da longitude solar.....	140
<b>Figura 92:</b> Imagens da região de Aeolis.....	142
<b>Figura 93:</b> Relação entre a cobertura de rastros calculada a partir das imagens processadas e de <i>ground truth</i> .....	143
<b>Figura 94:</b> Relação entre o contraste calculado a partir das imagens processadas e de <i>ground truth</i> .....	144
<b>Figura 95:</b> Relação entre a largura máxima dos rastros calculada a partir das imagens processadas e de <i>ground truth</i> .....	144
<b>Figura 96:</b> Relação entre a largura média dos rastros calculada a partir das imagens processadas e de <i>ground truth</i> .....	145
<b>Figura 97:</b> Imagens que não foram consideradas na análise dos dados.....	148
<b>Figura 98:</b> Diferentes direções obtidas para as imagens MOC E10-02468 e E14-00400.....	153
<b>Figura 99:</b> Diferentes direções obtidas para as imagens HiRISE ESP_013520_1180 e ESP_013991_1160.....	154
<b>Figura 100:</b> Rosas de direções para Aeolis (a), Argyre (b), Noachis (c), Eridania (d) e Hellas (e).....	156
<b>Figura 101:</b> Superfície de distorção angular para projeção Sinusoidal.....	158
<b>Figura 102:</b> Efeito da projeção Sinusoidal sobre imagem MOC.....	159
<b>Figura 103:</b> Superfície de distorção angular para projeção Equirretangular.....	159
<b>Figura 104:</b> Efeito da projeção Sinusoidal sobre imagem HiRISE.....	160
<b>Figura 105:</b> Disposição das imagens processadas da região de Argyre de acordo com suas longitudes solares.....	162
<b>Figura 106:</b> Frequências das direções dos rastros separadas por longitude solar em Argyre.....	163
<b>Figura 107:</b> Frequências das direções dos rastros na região de Argyre durante a primavera e verão.....	164

<b>Figura 108:</b> Componente zonal dos ventos em Argyre durante Ls: 240°-270°.....	164
<b>Figura 109:</b> Componente meridional dos ventos em Argyre durante Ls: 240°-270°.....	165
<b>Figura 110:</b> Componente zonal dos ventos em Argyre durante Ls: 270°-300°.....	165
<b>Figura 111:</b> Componente meridional dos ventos em Argyre durante Ls: 270°-300°.....	166
<b>Figura 112:</b> Componente zonal dos ventos em Argyre durante Ls: 300°-330°.....	166
<b>Figura 113:</b> Componente meridional dos ventos em Argyre durante Ls: 300°-330°.....	167
<b>Figura 114:</b> Componente zonal dos ventos em Argyre durante Ls: 330°-360°.....	167
<b>Figura 115:</b> Componente meridional dos ventos em Argyre durante Ls: 330°-360°.....	168
<b>Figura 116:</b> Covariâncias morfológicas para a imagem PSP_006163_1345A nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.....	168
<b>Figura 117:</b> Derivadas das covariâncias morfológicas para a imagem PSP_006163_1345A nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.....	169
<b>Figura 118:</b> Picos das covariâncias morfológicas para a imagem PSP_006163_1345A nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.....	170

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Determinação automática de limiar pelo método de Otsu.....	51
<b>Tabela 2:</b> Características de <i>dust devils</i> terrestres e marcianos.....	108
<b>Tabela 3:</b> Características do conjunto de imagens.....	112
<b>Tabela 4:</b> Sumário de informações sobre as imagens mostradas na Figura 74.....	126
<b>Tabela 5:</b> Acurácia da detecção de rastros nas imagens mostradas na Figura 74.....	133
<b>Tabela 6:</b> Acurácia do conjunto de 200 imagens processadas.....	133
<b>Tabela 7:</b> Estatística para o sensor HiRISE.....	134
<b>Tabela 8:</b> Estatística para o sensor MOC.....	134
<b>Tabela 9:</b> Estatística por região.....	136
<b>Tabela 10:</b> Informações sobre as imagens da Figura 87.....	137
<b>Tabela 11:</b> Informações sobre as imagens mostradas na Figura 88.....	138
<b>Tabela 12:</b> Informações sobre as imagens mostradas na Figura 89.....	138
<b>Tabela 13:</b> Informações de contraste e cobertura de rastros por região.....	141
<b>Tabela 14:</b> Largura dos rastros por região.....	143
<b>Tabela 15:</b> Características calculadas para as imagens da Figura 75 (imagens processadas).....	145
<b>Tabela 16:</b> Características calculadas para as imagens da Figura 84 ( <i>ground truth</i> ).....	146
<b>Tabela 17:</b> Discrepâncias ( $\Delta$ ) entre as características calculadas a partir das imagens processadas (Tabela 15) e a partir do <i>ground truth</i> (Tabela 16) para as imagens da Figura 74.....	146
<b>Tabela 18:</b> Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções obtidas a partir da aplicação da granulometria sobre o <i>ground truth</i> .....	149
<b>Tabela 19:</b> Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções obtidas a partir da aplicação da granulometria sobre as <i>imagens processadas</i> .....	149
<b>Tabela 20:</b> Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções dos gradientes calculados a partir do <i>ground truth</i> .....	150
<b>Tabela 21:</b> Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções dos gradientes calculados a partir do <i>ground truth</i> .....	151

<b>Tabela 22:</b> Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções calculadas por aberturas direcionais sobre o <i>ground truth</i> .....	151
<b>Tabela 23:</b> Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções calculadas por aberturas direcionais sobre as <i>imagens processadas</i> .....	152
<b>Tabela 24:</b> Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções calculadas por aberturas direcionais sobre as <i>imagens processadas</i> (desconsiderando os 3,16% de falha do método).....	152
<b>Tabela 25:</b> Direções calculadas a partir das imagens processadas mostradas na Figura 75.....	155
<b>Tabela 26:</b> Direções calculadas a partir do <i>ground truth</i> mostrado na Figura 84.....	155
<b>Tabela 27:</b> Direção dos ventos predita pelo GCM e direção dos rastros calculada para Argyre.....	163

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbb{Z}$	.....	Conjunto dos números inteiros
$\infty$	.....	Infinito
$\Rightarrow$	.....	Se
$\Leftrightarrow$	.....	Se, e somente se
$\leq$	.....	Menor ou igual
$\geq$	.....	Maior ou igual
$\forall$	.....	Para todo
$\wedge$	.....	Operador de ínfimo
$\vee$	.....	Operador de supremo
$\subset$	.....	Subconjunto próprio de
$\subseteq$	.....	Subconjunto de
$\cap$	.....	Interseção
$\cup$	.....	União
$\in$	.....	Pertence
$;$	.....	Tal que
$  $	.....	Módulo
$\rightarrow$	.....	Mapeamento
$\Sigma$	.....	Somatório
$\emptyset$	.....	Conjunto vazio
$X^c$	.....	Complemento de $X$
$\exists$	.....	Existe
$/$	.....	Diferença de conjunto

## SUMÁRIO

### Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1	Contextualização.....	20
1.2	Objetivo.....	22
1.3	Justificativa.....	22
1.4	Revisão bibliográfica.....	24
1.8	Organização do trabalho.....	33

### Capítulo 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1	Sensoriamento Remoto.....	35
2.2	Processamento Digital de Imagens.....	37
2.2.1	Binarização de imagens.....	45
2.2.2	Morfologia Matemática.....	53
2.2.3	Esqueletização de imagens.....	88
2.3	Visão Geral do planeta Marte.....	92
2.3.1	Sistema de Referência Geodésico.....	94
2.3.2	Cartografia de Marte.....	96
2.3.2.1	Projeção Sinusoidal.....	97
2.3.2.2	Projeção Equirretangular.....	98
2.4	Sensoriamento Remoto de Marte.....	99
2.5	<i>Dust Devils</i> .....	104

### Capítulo 3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1	Banco de imagens.....	111
3.2	Fundamentação do método.....	113
3.3	Descrição do método.....	117
3.4	Refinamento do método.....	118

**Capítulo 4**  
**RESULTADOS**

<b>4.1</b>	Processamento das imagens para detecção dos rastros.....	124
<b>4.2</b>	Análise quantitativa dos resultados.....	131
<b>4.2.1</b>	Avaliação em função da variação temporal.....	136
<b>4.3</b>	Caracterização dos rastros detectados.....	139
<b>4.3.1</b>	Largura média, contraste relativo e área coberta por rastros.....	139
<b>4.3.2</b>	Direção preponderante de deslocamento dos vórtices.....	147
<b>4.3.2.1</b>	Métodos para determinação das direções.....	147
<b>4.3.2.2</b>	Análise das direções calculadas.....	152
<b>4.3.2.3</b>	Verificação das projecções.....	156
<b>4.3.2.4</b>	Comparação das direções calculadas com a literatura e com o GCM.....	160
<b>4.3.3</b>	Cálculo de covariância.....	168

**Capítulo 5**  
**CONCLUSÃO**

<b>5.1</b>	Considerações finais e recomendações.....	172
<b>REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIAS.....</b>		<b>178</b>
<b>APÊNDICE .....</b>		<b>197</b>

---

Capítulo 1

**INTRODUÇÃO**

---

## 1.1 Contextualização

*Dust devils* são vórtices convectivos formados por correntes de ar quente instáveis, próximas à superfície, provocadas por insolação. Eles têm sido estudados na Terra por mais de um século (BADDELEY, 1860; IVES, 1947; BROOKS, 1960; TANNER, 1963; SINCLAIR, 1966; IDSO, 1974) e foram observados pela primeira vez em Marte nas imagens orbitais obtidas pelo programa *Viking* (1975) (THOMAS e GIERASCH, 1985). Até se descobrir que eram vórtices convectivos, os rastros de *dust devils* eram chamados genericamente de filamentos escuros (como escreveu Verveka (1976): *dark filamentary markings*). Esses fenômenos são semelhantes aos tornados terrestres, exceto pelo fato de que são causados exclusivamente pelo fluxo de calor superficial e de sua intensidade depender da profundidade da *camada limite planetária* (camada atmosférica sujeita a rápidas variações de pressão, temperatura e umidade, em parte por causa de sua proximidade com a superfície), enquanto tornados são alimentados pela liberação de calor latente em sua coluna (HINSON et al., 2008; SPIGA et al., 2010). Além disso, *dust devils* podem se formar sob céu limpo e não têm relação com tempestades (BALME e GREELEY, 2006). Cantor, Kanak e Edgett (2006) comentam que, por dependerem do fluxo de calor da superfície e apresentarem certa correlação com a morfologia do terreno, *dust devils* possuem dimensões variáveis e relatam terem observado vórtices com até 1.750 m de diâmetro e 8.000 m de altura em Marte.

Seguindo seu programa de exploração espacial, em novembro de 1996 a NASA enviou a Marte a missão *Mars Global Surveyor* com a câmera de alta resolução *Mars Orbiter Camera* (MOC), que registrou imagens do planeta entre os anos de 1997 e 2006 a uma resolução espacial de até 1,5 m por pixel. Em agosto de 2005 outra missão foi enviada: *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), a bordo da qual a câmera HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment*) tem imageado o planeta desde então com resoluções de até 0,25 m. Cantor, Kanak e Edgett (2006) analisaram 223.350 imagens MOC, nas quais identificaram 11.456 *dust devils*. Destes, 11,5% foram vistos no hemisfério sul e 88,5% no hemisfério norte. Apesar destes fenômenos serem vistos com certa frequência em todas as estações do ano, o pico de ocorrência acontece durante o verão em cada hemisfério. O conhecimento sobre a atividade dos *dust devils* é de vital importância para compreender o clima, a geologia e as modificações da superfície de Marte, e o perfeito entendimento do ambiente marciano é essencial para o planejamento de missões tripuladas ao planeta (BALME, WHELLEY e GREELEY, 2003; BALME e GREELEY, 2006).

Örmo e Komatso (2003) afirmam que a circulação de ar é o único fator modelador da superfície atualmente ativo em Marte, em uma escala de tempo geologicamente pequena, e estudos realizados pelos autores mostram que *dust devils* podem ser considerados a maior causa da presença de feições lineares e curvilineares na superfície daquele planeta. O modelo de circulação geral (do inglês *General Circulation Model* - GCM) da atmosfera marciana indica que o comportamento geral dos ventos segue um padrão N-S e E-W (GREELEY et al., 1992) e uma das poucas técnicas de verificação destes modelos baseia-se na comparação entre a direção dos ventos preditos em teoria e a orientação de feições oriundas de processos eólicos. Análises da direção dos ventos nas regiões da cratera *Proctor* e da bacia *Hellas* pela observação, em imagens orbitais, da orientação de dunas, *ripples* (pequenas ondulações de areia) e rastros de *dust devils*, concluíram que a circulação atmosférica naquelas regiões se dá nos sentidos NE-SW e NW-SE, contrastando com as simulações do GCM e evidenciando a necessidade de estudos mais detalhados sobre processos eólicos em Marte (ÖRMO e KOMATSO, 2003; BALME, WHELLEY e GREELEY, 2003; FENTON, TOIGO e RICHARDSON, 2005). Alguns rastros de *dust devils* chegam a medir dezenas de metros em largura por dezenas de quilômetros em comprimento. Nem todos *dust devils* produzem rastros (apenas 14% deles foram observados deixando um rastro visível nas imagens MOC) e apesar de alguns deles exibirem tons de cinza claros nas imagens orbitais, a imensa maioria contrasta com feições vizinhas por serem muito escuros (CANTOR, KANAK e EDGETT, 2006).

Muitas informações sobre Marte podem ser adquiridas através da análise de imagens digitais. São centenas de imagens em alta resolução da superfície marciana que foram e estão sendo adquiridas pelos satélites MGS e MRO possibilitando, dentre outros, estudos sobre Geologia e monitoramento de processos eólicos em um nível de detalhes nunca antes alcançado (NASA, 1997; BRIDGES et al., 2007). O número de imagens geradas (e a quantidade de dados contida nelas) cresce a uma taxa maior do que a capacidade de operadores humanos em analisar e extrair informações relevantes desses produtos para caracterização do planeta em estudo (BANDEIRA, SARAIVA e PINA, 2007). Isso abre espaço para a utilização de processos automáticos de extração de informações, e é nesta área que este trabalho se enquadra. A proposta foi usar recursos de Processamento Digital de Imagens, com ênfase na Morfologia Matemática, para detectar automaticamente rastros de *dust devils* em imagens orbitais HiRISE e MOC. O método adotado compreende a aplicação de operações de filtragem como as de abertura e fechamento morfológicos por área, para eliminação de pequenas sombras de rochas, ruídos causados por distorções radiométricas e atenuação de padrões claros, oriundos da reflectância de dunas e rochas; aplicação de *top-hat*

com base em fechamento por caminhos para eliminar a função de iluminação das cenas, que passam a ter histogramas aproximadamente bimodais, facilitando a binarização automática para detecção das feições; detecção de bordas dos rastros; cálculo da área coberta pelos rastros nas imagens; cálculo do contraste relativo entre rastros e regiões vizinhas; análise granulométrica para inferir a largura das feições; e aberturas morfológicas radiais com elementos estruturantes lineares para inferência da direção dos rastros. A rotina foi programada no *software* Matlab e se aproveita de funções disponíveis na caixa de ferramentas específica para Morfologia Matemática *SDC Morphology Toolbox for Matlab* e também na caixa de ferramentas *DIP Image*, desenvolvida pela *Delft University of Technology*.

## **1.2 Objetivo**

O objetivos do trabalho foram:

- Contribuir para a automação de processos de extração de informações a partir de imagens digitais;
- Utilizar Processamento Digital de Imagens, com ênfase na teoria da Morfologia Matemática, para detectar automaticamente rastros de *dust devils* na superfície de Marte em imagens orbitais;
- A partir das feições detectadas, calcular certas características dos rastros, como orientação, largura média, contraste relativo e área coberta, que permitam inferir informações sobre os vórtices e sobre a superfície.

## **1.3 Justificativa**

A relevância do trabalho reside no fato de haver uma grande necessidade de processos automatizados para extração de informações a partir de imagens orbitais. Uma quantidade cada vez maior de satélites é enviada ao planeta Marte e milhares de imagens que estão sendo adquiridas não podem ser analisadas individualmente, do ponto de vista qualitativo. A seção 1.4, que apresenta uma revisão dos trabalhos publicados sobre o assunto,

dá uma ideia da dificuldade em se fazer análises qualitativas em bases de dados com elevado número de imagens. Somado a isso, a detecção automática e consequente caracterização detalhada de rastros de *dust devils* contribuirá para:

- O entendimento de processos eólicos ativos em Marte, como a formação de tempestades de areia, dunas e *ripples*;
- O entendimento das variações locais de temperatura do planeta: a poeira espalhada pelos vórtices contribui para a opacidade da atmosfera, causando aumento da temperatura local;
- Estimativa da quantidade de areia e poeira espalhada na superfície: por meio da detecção de seus rastros, é possível estimar a quantidade de material injetado na atmosfera pelos seus vórtices.
- Verificação de modelos de circulação geral da atmosfera marciana: um modelo que inclua a parametrização da formação de *dust devils* e sua habilidade em espalhar poeira, junto com dados de sensoriamento remoto e medidas *in situ*, fornecerá uma ferramenta poderosa para entender o clima global e as interações de *dust devils* com a superfície de Marte;
- O mapeamento de áreas de risco: para que missões tripuladas possam ser enviadas ao planeta é preciso que seja feita uma cartografia detalhada de Marte a fim de que se possa planejar e selecionar áreas seguras para exploração;
- Análise da superfície sob a camada de areia e poeira por sensores multiespectrais: ao longo da trajetória dos *dust devils* é possível vislumbrar o substrato da superfície empoeirada do planeta. Sensores multiespectrais podem coletar dados nestes rastros deixados pelos vórtices, e a informação obtida destes dados ajudaria a entender a composição do solo marciano;
- Inferência da espessura da camada de poeira e areia sobre a superfície: o contraste relativo entre os rastros e as regiões vizinhas depende da camada de material que recobre a superfície. Em geral, nas regiões onde esta camada é mais espessa os rastros são mais tênues e, onde ela é mais fina, os rastros são mais bem definidos.
- Futuros estudos em áreas como Geologia, Climatologia e Cartografia de Marte: no passado, Marte possuía uma atmosfera mais densa e temperaturas mais quentes, similares às da Terra nos dias atuais. Entender a evolução e as transformações ocorridas em Marte pode ajudar a prever a evolução do nosso próprio planeta.

## 1.4 Revisão bibliográfica

Desde que *dust devils* e seus rastros foram vistos pela primeira vez em imagens orbitais de Marte, uma série de pesquisadores tem concentrado esforços na compreensão e descrição detalhada deste fenômeno (VEVERKA, 1976; GRANT e SCHULTZ, 1987; BALME e GREELEY, 2006). Os trabalhos publicados sobre o assunto envolvem, de maneira geral, a simulação numérica e mecânica de *dust devils* em laboratório, metodologias para identificação de vórtices a partir de instrumentos embarcados em robôs pousados na superfície marciana, detecção de vórtices e rastros a partir de imagens orbitais, além de estudos sobre suas propriedades termais e elétricas. Alguns dos trabalhos mais relevantes são discutidos a seguir.

Metzger et al. (2000) comentam sobre a dificuldade em se identificar *dust devils* nas imagens de instrumentos embarcados em robôs exploradores da superfície marciana porque a coloração avermelhada dos vórtices (causada pela alta concentração de dióxido de ferro nas partículas suspensas) os confundem com o céu visto ao horizonte (também avermelhado). Os autores se aproveitam do fato de que o óxido de ferro exibe alta reflectância para comprimentos de onda de radiação eletromagnética de 670 nm (nanômetros) e baixa reflectância para comprimentos de 440 nm e propõem a subtração entre as bandas do azul e vermelho para realçar os vórtices.

Murphy e Nelli (2002) testaram uma abordagem diferente, fazendo uso de dados meteorológicos como pressão e temperatura para estimar a frequência de *dust devils* na região de pouso do robô *Mars Pathfinder* (numa antiga planície aluvial denominada *Ares Vallis*, nas latitude 19,5° N e longitude 32,8° W). A presença do vórtice provoca uma variação abrupta de pressão (no interior do cone a pressão cai e a temperatura aumenta) e temperatura na região. Foram detectados 79 *dust devils* durante o período de recobrimento dos dados (83 sol – dia solar marciano) com pico de frequência por volta das 14:00h locais, horário mais quente e, portanto, mais favorável a processos de convecção e à formação de *dust devils*, como salientam Lyons e Foster (2008).

Ferri et al. (2003) combinam os dois métodos, usando imagens e dados meteorológicos para identificar a presença de *dust devils* próximos ao *Pathfinder*, além de fazerem uma estimativa sobre a quantidade de sedimentos espalhada pelos vórtices, num método semelhante ao proposto por Hall e Lemmon (2009). Assim como nos trabalhos anteriores, nada é comentado sobre o método empregado na contagem dos *dust devils*, ficando

implícito que a mesma foi feita manualmente, assim como no trabalho de Renno et al. (2004), que estudaram propriedades elétricas de *dust devils* terrestres na tentativa de poder extrapolar os resultados para *dust devils* marcianos.

Para detecção à superfície de *dust devils* por robôs, A. Castano et al. (2006, 2008) e R. Castano (2006) propuseram a utilização de sequências temporais de imagens num processo similar ao utilizado em alguns sistemas de vigilância e obtiveram bons resultados, identificado corretamente *dust devils* em 85% de 25 sequências de imagens. O método baseia-se na comparação entre imagens que apresentam apenas o céu ao fundo e imagens que flagram a presença de vórtices. Uma subtração simples entre as cenas acusa a presença do fenômeno. O método é dependente, logicamente, da existência de câmeras que capturem sequências temporais de imagens. Um instrumento deste tipo para identificação de *dust devils* terrestres é proposto por Lorenz et al. (2009) e Lorenz (2010, 2011). Lorenz et al. (2005), inclusive, comentam que *dust devils* terrestres são capazes de provocar avarias em aviões e que já foram responsáveis por acidentes aéreos.

Greeley et al. (2006) usam dados do robô *Spirit* (um dos MER - *Mars Exploration Rovers* - que esteve ativo entre 2004 e 2010 no interior da cratera *Gusev*, a cerca de 14,5° N de latitude e 175,5° E de longitude) para identificar *dust devils* e usam sequências de imagens tomadas pelo robô aliadas a imagens orbitais para determinar suas direções de movimento na região da cratera *Gusev* durante as estações da primavera e verão (conforme relatam Balme e Greeley (2006), há uma correlação bastante alta entre a formação de *dust devils* e as estações mais quentes) do hemisfério sul. Foram observados 533 *dust devils* com diâmetros variando de 2 a 276 m. A identificação, determinação das direções e contagem de vórtices foi feita manualmente.

Toigo et al. (2003) desenvolveram uma simulação numérica para *dust devils* marcianos. Os autores propuseram um modelo de alta resolução para examinar os vórtices em detalhes e comparar os resultados com observações reais. Renno (2008) também tentou descrever o fenômeno analiticamente e propôs uma teoria baseada na termodinâmica para explicá-los.

Greeley et al.(2003) fizeram o mesmo, porém, a simulação foi mecânica. Foi construído um aparato para emular *dust devils* terrestres e marcianos. Os autores fazem algumas especulações sobre a influência da topografia na criação e no movimento dos vórtices e através das simulações perceberam que, apesar de a velocidade tangencial às vezes ser insuficiente para provocar a ejeção de sedimentos, o interior do cone, por causa da baixa pressão, provoca um vácuo que se encarrega de elevar areia e poeira no caminho percorrido

pelo *dust devil*. Tal conclusão é confirmada pelos experimentos de Neakrase e Greeley (2010).

Ringrose et al. (2007) descrevem um método para detectar *dust devils* e vórtices convectivos (os quais não elevam sedimentos e, portanto, não podem ser vistos) a partir de dados meteorológicos, sem a necessidade de confirmação visual. O fenômeno é detectado por alterações locais em pressão, velocidade do vento, temperatura e taxa de transporte de sedimentos. Eles se basearam em experimentos terrestres para extrapolar os resultados para os fenômenos marcianos.

Um estudo importante que pode ajudar a explicar a variação espacial de *dust devils* foi feito por Hinson et al. (2008). Os autores analisam a altura da camada atmosférica convectiva. Por estar sujeita a rápidas variações em pressão, temperatura e velocidade, é nesta camada que se formam os *dust devils*. Os dados foram coletados no hemisfério norte e as observações foram bem espalhadas em latitude e longitude, porém, numa janela de tempo pequena (17:00h - 17:30h locais). Os autores determinaram que a altura é de aproximadamente 3 - 10 km sobre a superfície na época do ano estudada (meio da primavera marciana: maio-agosto de 2004). Para uma hora local fixa, a altura é correlacionada com variações na elevação da superfície. Em geral, a altura é maior (8 - 10 km) em locais mais elevados e menor (4 - 6 km) em locais mais baixos. Os autores concluem que, como a convecção é causada pela insolação e seus efeitos são maiores em locais com baixa pressão e atmosfera mais fina, os eventos convectivos devem se formar com maior frequência em regiões mais elevadas. Infelizmente a janela de tempo estudada não coincide com o horário mais favorável ao surgimento de vórtices (12:00h - 14:00h).

Cantor, Malin e Edgett (2002) fazem uma análise temporal de feições meteorológicas como nuvens, tempestades de areia e *dust devils* durante o verão do hemisfério norte marciano entre os anos terrestres de 1997 a 2001 com base em imagens da câmera *Mars Orbiter Camera* (MOC) a bordo da sonda *Mars Global Surveyor* (MGS). Os autores descobriram que há uma repetição no aparecimento das feições estudadas e que, portanto, é possível prever a posição de ocorrência de certas nuvens muito proeminentes, tempestades e vórtices convectivos.

Yang, Mlnsa e Geissler (2006) usam um modelo gaussiano para identificar *dust devils* em imagens orbitais. Na construção do filtro, os autores modelaram os *dust devils* da seguinte maneira: 1) Seu vórtice forma uma coluna alta e tende a parecer circular vista de cima; 2) Os vórtices são iluminados pelo sol a partir de uma direção conhecida, criando uma parte mais clara e uma mais escura na pluma; 3) Os vórtices fazem sombras com orientações

conhecidas; e 4) A posição, o tamanho e a forma de *dust devils* variam no tempo. O trabalho apresenta poucas imagens processadas, nas quais se percebe muitos *falsos positivos*. São utilizadas imagens MOC de baixa resolução espacial ( $\sim 300$  m por pixel) e o método empregado baseia-se na subtração de cenas tomadas em momentos consecutivos, assim existe a dependência de um sistema de sensoriamento capaz de adquirir tais imagens com alta taxa de repetição. Além disso, os parâmetros do filtro gaussiano e da etapa de binarização para detecção das feições são escolhidos manualmente por experiência do operador ou por tentativa e erro.

Stanzel, Pätzold e Wennmacher (2006) também se dedicaram a construir um algoritmo para detecção de *dust devils* em imagens orbitais. O método é mais simples que o descrito anteriormente e se baseia na identificação de máximos locais (vórtices) e mínimos locais (sombras dos vórtices). O algoritmo é semi-automático e a exemplo do método proposto por Yang, Mlnsa e Geissler (2006) produz muitos falsos-positivos.

Stanzel et al. (2006) utilizaram imagens *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) da sonda *Mars Express* (ME) para determinar, pela primeira vez, a velocidade de deslocamento de *dust devils* diretamente da órbita. Os resultados mostraram velocidades médias da ordem de  $20 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$  (máxima de  $26,8 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$  e mínima de  $15 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ ). Os autores comentam que os *dust devils* se movem de acordo com os ventos locais, mas nenhuma direção é calculada para o deslocamento dos vórtices observados.

Whelley e Greeley (2006) defendem a tese de que existe uma dependência latitudinal na formação de *dust devils*. Os autores estudaram três regiões: cratera Gusev (aproveitando o fato de ali se encontrar o robô *Spirit*), Ares Vallis (local em que se encontrava a *Pathfinder*) e uma faixa de pólo a pólo entre as longitudes de  $100^\circ$  W a  $120^\circ$  W. Para inferir a quantidade de *dust devils*, um total de 115.959 rastros em 6.002 imagens MOC de alta resolução foram catalogados. Os dados, para cada imagem, foram normalizados dividindo-se a quantidade de rastros pela área da cena, definindo assim uma densidade de rastros ( $\text{rastros}\times\text{km}^{-2}$ ). *Argyre Planitia* teve a maior variação de rastros:  $2,4 \text{ rastros}\times\text{km}^{-2}$  no verão e nenhum no inverno. Na faixa latitudinal, a maior densidade para todas as estações foi encontrada entre as latitudes de  $50^\circ$  S e  $60^\circ$  S com  $1,24 \text{ rastros}\times\text{km}^{-2}$ . No hemisfério norte, a maior densidade foi encontrada entre as latitudes  $60^\circ$  N e  $70^\circ$  N, sendo esta menor que a densidade encontrada no hemisfério sul. Segundo os autores, isso pode ser explicado por uma diferença em aquecimento no hemisfério sul (que recebe aproximadamente 40% mais de energia solar no verão devido à excentricidade da órbita de Marte), conforme previsões do modelo de circulação global (do inglês *Global Circulation Model* - GCM) da atmosfera

marciana (HABERLE et al., 1993). Além disso, diferenças na espessura da camada de areia e poeira entre as regiões norte e sul podem explicar a maior densidade de rastros no hemisfério sul. Este pode ser recoberto por uma camada mais fina, mais facilmente espalhada pelos vórtices, e possuir um substrato que exibe baixa reflectância, tornando mais fácil a identificação dos rastros. A camada que recobre a região norte pode ser mais espessa, o que dificultaria o aparecimento de rastros: somente vórtices maiores conseguiriam varrer a poeira e sedimentos a ponto de deixar à mostra o substrato. O próprio substrato tem papel importante na interpretação dos dados: para que o rastro se torne visível é preciso haver uma diferença de reflectância entre a camada de poeira e sedimentos que cobre a superfície planetária e o seu substrato (EDGETT e MALIN, 2000). Estas questões ainda precisam ser estudadas em maiores detalhes. A contagem dos rastros foi manual e os autores não comentam como, especificamente, as feições foram consideradas.

Stanzel et al. (2008) observaram um total de 205 *dust devils* em 23 *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) tomadas entre janeiro/2004 e julho/2006 pela sonda *Mars Express*, nas áreas de *Amazonis Planitia*, *Syria Planum* e *Chryse Planitia*. A altura média dos *dust devils* foi de  $\sim 660$  m com diâmetro médio de  $\sim 230$  m. A velocidade dos vórtices foi diretamente medida da órbita, resultando em  $\sim 1$  a  $59 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ . As direções de movimento foram consistentes com as previstas pelo GCM marciano. A taxa de espalhamento de poeira também foi calculada e chegou-se ao resultado de  $\sim 19 \text{ kg}\times\text{m}^{-2}\times\text{sol}$ . A maioria dos *dust devils* encontrados no hemisfério sul (70 de 95, ou 73,7%) estavam entre as latitudes  $50^\circ$  S e  $60^\circ$  S. Em longitude, foram encontrados *dust devils* entre  $14^\circ$  E a  $170^\circ$  E. Foi avistada aproximadamente a mesma quantia de *dust devils* nos hemisférios Sul ( $\sim 54\%$ ) e Norte ( $\sim 46\%$ ), contrastando com resultados apresentados por Whelley e Greeley (2006). Concordando com outros trabalhos, o pico de ocorrência se deu perto das 14:00h locais. Das três áreas estudadas, *Amazonis Planitia* apresentou a mais baixa frequência de ocorrência (2,3% das imagens apresentaram *dust devils*). *Syria Planum* apresentou *dust devils* em 17,6% das imagens e *Chryse Planitia* apresentou vórtices em 30,8% das imagens. Os *dust devils* foram identificados visualmente, a exemplo de outros trabalhos.

Lorenz (2009) defendeu que a distribuição de tamanhos de *dust devils* se encaixa melhor à lei da potência (com potência -2) do que a uma função exponencial, conforme proposto por Kurgansky (2006). O autor mostra que há uma grande relação entre o diâmetro dos vórtices e sua frequência de aparecimento: quanto maior o diâmetro observado, menor a frequência. Pathare et al. (2010) se basearam no trabalho de Lorenz e tentaram descrever a distribuição de frequência de *dust devils* terrestres com a lei da potência. Embora, segundo

Balme e Greeley (2006), *dust devils* marcianos e terrestres exibam grande semelhança (no processo de formação, estrutura, etc.), neste caso uma função exponencial se adequou melhor aos dados. Os autores comentam que tal resultado pode ser consequência do menor diâmetro observado em *dust devils* terrestres, já que a lei da potência proposta por Lorenz utiliza um limiar de corte: não são considerados fenômenos com diâmetro menor que 10 m para que o ajuste à lei da potência funcione satisfatoriamente.

Towner (2009) estudou as propriedades termais de *dust devils* marcianos. Ele utilizou imagens da câmera *Thermal Emission Imaging System* (THEMIS) da sonda *Mars Odyssey*. Foram investigadas 3.079 imagens tomadas nas estações da primavera, verão e outono do hemisfério norte. Imagens MOC e HSRC também foram usadas para dirimir eventuais dúvidas. Foram encontrados 8 exemplos claros de *dust devils* em 5 diferentes imagens. A contagem foi feita visualmente. O número pequeno de identificações se deve à baixa resolução espacial dos dados THEMIS (100 m) e ao horário de passagem da sonda que é no fim da tarde. Os dados indicam que a poeira levantada e o local de projeção da sombra do vórtice são mais frios que a vizinhança. O interior do cone convectivo provavelmente é mais quente, segundo trabalhos já feitos, mas o imageador só pode detectar a temperatura advinda da nuvem de poeira e sedimentos. Usando as imagens da faixa espectral do visível foi possível calcular a opacidade da coluna dos *dust devils* e estimar o carregamento de poeira que ficou entre  $1,9 \times 10^{-5}$  e  $1,5 \times 10^{-4} \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ , similar a observações feitas por robôs pousados na superfície.

Edgett e Malin (2000) e Edgett (2002) comentaram que *dust devils* são importantes agentes controladores da resposta espectral da superfície marciana. Os rastros escuros deixados por eles diminuem a reflectância da região e, em contrapartida, a poeira espalhada pelo vórtice aumenta esta resposta em imagens do visível e infravermelho próximo. Rossi (2002) encontrou o mesmo padrão em *dust devils* terrestres observados em imagens ASTER visível e infravermelho próximo, no deserto de Teneré na Nigéria. Em ambos os trabalhos nenhuma contagem foi feita, sendo a análise apenas visual.

Ormö e Komatsu (2003) comentam que muitos trabalhos já relatavam a existência de filamentos escuros nas imagens orbitais de Marte e especulava-se que eram formados por ação do vento, muito embora não se pudesse dizer com certeza se era um processo erosivo ou de deposição (VEVERKA, 1976; GRANT e SCHULTZ, 1987). Os autores relatam a observação de feições lineares e curvilineares com 10 a 100 m de largura e com até alguns quilômetros de comprimento em imagens MOC da superfície de Marte. Eles compararam estas feições a análogos terrestres na tentativa de fazer a correta interpretação das feições no

solo marciano. Num estágio inicial, aproximadamente 1.700 imagens foram selecionadas aleatoriamente, globalmente distribuídas, para investigar a presença de feições de interesse. Ao se descobrir que havia uma variedade grande dessas feições na bacia de *Hellas*, optou-se por esta área de trabalho. Foram usadas então 108 imagens e as feições em cada imagem foram catalogadas de acordo com variações na largura, comprimento, linearidade, penetração aparente na superfície e paralelismo. A maioria das feições na bacia tem direção SW-NE e NW-SE. Os autores concluem que *dust devils* são a causa mais comum de feições lineares e curvilíneas na superfície. A direção dos vórtices naquela bacia difere da predita pelo GCM (N-S e E-W, de acordo com Greeley et al., 1992), indicando que mais estudos sobre a relação entre *dust devils* e o comportamento da atmosfera são necessários.

Balme, Whelley e Greeley (2003) investigaram a grande frequência de *dust devils* em *Argyre Planitia* e *Hellas* numa pesquisa com mais de 3.000 imagens MOC no período de 1997 a 2002. As áreas de estudo foram escolhidas por apresentar várias unidades geomorfológicas, variações em elevação e estarem aproximadamente na mesma latitude, evitando qualquer dependência latitudinal dos fenômenos. Nas duas áreas os rastros ocorrem predominantemente no verão e são raramente vistos no inverno. Estimou-se que a duração dos rastros, isto é, o tempo em que permanecem claramente visíveis na superfície marciana, é de poucos meses pela análise temporal da região. A contagem dos rastros foi feita manualmente e depois verificada por outros dois pesquisadores (segundo um processo de amostragem). Com base nos valores médios de densidade de rastros, os autores também calcularam a quantidade de matéria ejetada na atmosfera.

Whelley, Greeley e Neakrase (2004a, 2004b) tentaram determinar a direção dos *dust devils* marcianos com base na análise de seus rastros. Eles comentam que o sentido de deslocamento pode ser facilmente inferido, mas a direção é mais difícil porque não se pode saber com certeza onde eles começam e terminam. Os autores fizeram uma simulação em laboratório e com base na aparência semicircular de alguns rastros foi possível descobrir a direção de deslocamento do fenômeno. Porém, não é possível ver o padrão semicircular na maioria dos rastros capturados nas imagens orbitais. Além disso, o trabalho apresenta o resultado apenas para poucos rastros em uma única cena.

Fenton, Toigo e Richardson (2005) estudaram o comportamento da baixa atmosfera marciana através da análise da direção de feições eólicas, como dunas e *dust devils*. A direção das dunas dá uma ideia da direção de ventos mais fortes. E como há poucos dados sobre a direção dos ventos medidos *in situ*, a análise de feições eólicas serve como comparação para os modelos de circulação existentes. Os autores usaram um modelo de

escala regional que pode ser combinado com imagens de alta resolução MOC. Tal análise permite não apenas testar os modelos de circulação atmosférica de escalas média e global, mas também entender a formação da paisagem marciana e sua morfologia. Os autores comentaram que alguns modelos locais aplicados a crateras e vales (GREELEY et al., 2001; KUZMIN et al., 2001) e ao pólo norte marciano (HOWARD, 2000) produzem resultados diferentes dos preditos pelo modelo global, devido a variações causadas por efeitos topográficos e diurnos no fluxo de vento. Ficou claro, pela discussão, que modelos com altas resoluções espacial e temporal são necessários para compreender padrões de vento locais e regionais. Neste trabalho os autores aplicaram um modelo de escala média à cratera *Proctor* e avaliaram os resultados para descobrir como o modelo concorda com as feições eólicas presentes no local. Rastros de *dust devils* foram identificados na maioria das imagens do verão e primavera. A maioria dos rastros e outras feições eólicas estão orientados na direção WSW-ENE. Os autores concluíram, portanto, que os ventos na região seguem uma direção WSW (apenas pela análise de rastros de *dust devils* não é possível saber a direção exata de seu percorrimto uma vez que não é possível definir onde o rastro se inicia e termina. Porém, foi visto pelo menos um *dust devil* em ação seguindo a direção SWS). Comparando as feições com o modelo de média escala empregado, os autores concluem que os resultados do modelo são consistentes com as observações. Tanto neste trabalho quanto no de Fisher et al. (2005), que também fizeram estudos relacionados à frequência de *dust devils* com base na identificação de vórtices e rastros, nada é dito sobre o método empregado na contagem e medição da orientação dos rastros, que são feitas manualmente.

Cantor, Kanak e Edgett (2006) analisaram 167.254 imagens MOC em busca de *dust devils* e seus rastros. Foram identificados (contagem visual) 11.456 vórtices, dos quais 88,5% no hemisfério norte. Destes, 99,2% foram detectados em *Amazonis Planitia*. Os autores comentam que apenas cerca de 14% dos *dust devils* imageados em ação pelas câmeras da MOC criaram rastros. Isso implica que a utilização de rastros para inferir a frequência do fenômeno subestima a real taxa de ocorrência. Foram encontrados rastros claros, um tipo raro de feição, nas regiões de *Syria Planum* e noroeste de *Amazonis Planitia*. Com base na modificação constante de reflectância exibida por certas regiões, os autores concluem que *dust devils* são mais frequentes em *Noachis*, *Cimmeria*, *Prometei* e *Hellas*.

Whelley e Greeley (2008) usaram rastros de *dust devils* para inferir globalmente a atividade deste fenômeno e tentar correlacioná-lo com características topográficas. Os autores pesquisaram 1.238 imagens MOC para contagem manual das feições de interesse. A maior quantidade de rastros foi encontrada no hemisfério sul. A densidade de rastros por área foi

calculada com base numa binarização: a área dos rastros detectada pela binarização foi dividida pela área total de cada cena. Nem todas as imagens foram utilizadas, tendo sido escolhidas aquelas em que se viam apenas os rastros como feições escuras (para que os resultados não fossem afetados por sombras de crateras e outras feições escuras possivelmente detectadas como rastros de *dust devils* pela binarização). Nada é comentado sobre qual foi o método de binarização empregado e tampouco se ele é automático. Os autores concluíram que a formação de *dust devils* não apresenta relação com propriedades físicas da superfície como elevação do terreno, declividade, espessura da camada de poeira, etc.

Verba et al. (2010) confirmam as observações de Cantor, Kanak e Edgett (2006) de que a maioria dos *dust devils* não deixa rastros. Os autores usaram imagens da câmera *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE) entre os anos de 2006 e 2008 da cratera *Gusev* e compararam-nas com dados do robô *Spirit* pousado naquela região. Descobriu-se que a relação de rastros formados foi menor que 1/110 dos vórtices observados em imagens *Spirit*. Além de *Gusev*, também foram estudadas imagens da cratera *Russell*. Esta, comparativamente, apresentou uma quantidade maior de rastros (1.486 contra 640 em *Gusev*). Segundo os autores tal fato é explicado pela diferença de espessura da camada de poeira e sedimentos que recobrem as áreas. Na cratera *Russell* a camada é mais fina e mesmo os vórtices menores são capazes de criar rastros, o mesmo não acontecendo com a região de *Gusev*. A direção dos rastros foi medida manualmente e condiz com dados do GCM.

Reiss, Raack e Hiesinger (2011) reportam a descoberta dos primeiros rastros claros de *dust devils* terrestres, observados no deserto de Turpan a noroeste da China. Impactos de pingos de chuva na superfície da areia formam agregados de areia, silte e argila, resultado em uma superfície de textura rugosa. Esta é destruída pela passagem de *dust devils* que provocam a suavização da superfície e alteram a resposta espectral de maneira que tais áreas apresentam maior reflectância que sua vizinhança em algumas faixas espectrais. Nos casos de rastros escuros ocorre o oposto: a areia e poeira são espalhadas deixando à mostra uma superfície mais heterogênea e rugosa. Os rastros escuros geralmente são apagados pela deposição de areia e poeira sobre eles. Os claros ficam invisíveis pela destruição contínua dos agregados de areia e poeira que os circundam, tornando as respostas destas regiões idênticas às dos rastros.

Nenhum dos trabalhos apresentados trata da detecção automática de rastros de *dust devils* marcianos em imagens orbitais. Todos aqueles relacionados à identificação, contagem e análise de *dust devils* e seus rastros utilizam um método manual. Como exemplos, Ormö e Komatsu (2003), Balme, Whelley e Greeley (2003), Fisher et al. (2005), Drake et al.

(2006), Whelley e Greeley (2006), Cantor, Kanak e Edgett (2006), Whelley e Greeley (2008) pesquisaram, respectivamente, 1.700, 3.000, 8.116, 1.734, 6.002, 167.254 e 1.238 imagens MOC; Stanzel et al. (2008) pesquisaram 23 imagens HRSC e Towner (2009) pesquisou 3.079 imagens THEMIS. O total de imagens analisadas manualmente, nos trabalhos citados, é de 192.146. O tempo gasto fazendo-se buscas por *dust devils* e seus rastros nestas imagens poderia ser mais bem empregado na análise e interpretação do fenômeno. Além disso, nos trabalhos em que se recorre à contagem de rastros, nada é explicado sobre qual o método empregado na seleção dos rastros que serão evidentemente contabilizados. Em regiões de ocorrência de *dust devils*, geralmente encontra-se uma miríade de filamentos escuros sem direção, largura e comprimentos definidos. Muitos rastros recém-formados sobrepõem-se a rastros de outras estações, já praticamente apagados pela deposição de sedimentos. Em algumas situações a densidade de ocorrência é tamanha que se torna impossível separar exatamente um rastro de outros. Nenhuma destas questões é abordada em qualquer dos trabalhos publicados e merecem ser estudadas em mais detalhes, bem como a determinação de um método automático para detecção dos rastros de *dust devils*.

## **1.5 Organização do trabalho**

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: o capítulo 2 trata da *fundamentação teórica* necessária ao perfeito entendimento dos capítulos subsequentes. A revisão abrangeu alguns conceitos de Sensoriamento Remoto e Processamento Digital de Imagens, binarização automática de imagens, os fundamentos da teoria da Morfologia Matemática e alguns métodos de esqueletização de imagens. O capítulo 3 apresenta os *materiais* utilizados no desenvolvimento do trabalho, como *software*, *hardware* e imagens orbitais, e também explica em detalhes o *método* adotado para se chegar ao objetivo da pesquisa. O capítulo 4 descreve o *desenvolvimento* do trabalho e os *resultados* obtidos. O capítulo 5 aborda as *conclusões* da pesquisa e recomendações para futuros trabalhos. Finalmente, o capítulo sobre *referências e bibliografias* elenca todos os trabalhos citados no corpo desta tese e que serviram de referência direta ou indireta para a sua redação, além de trabalhos relacionados ao tema da tese mas que não foram referidos no texto, estes últimos assumindo caráter de leitura complementar.

---

Capítulo 2

**FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

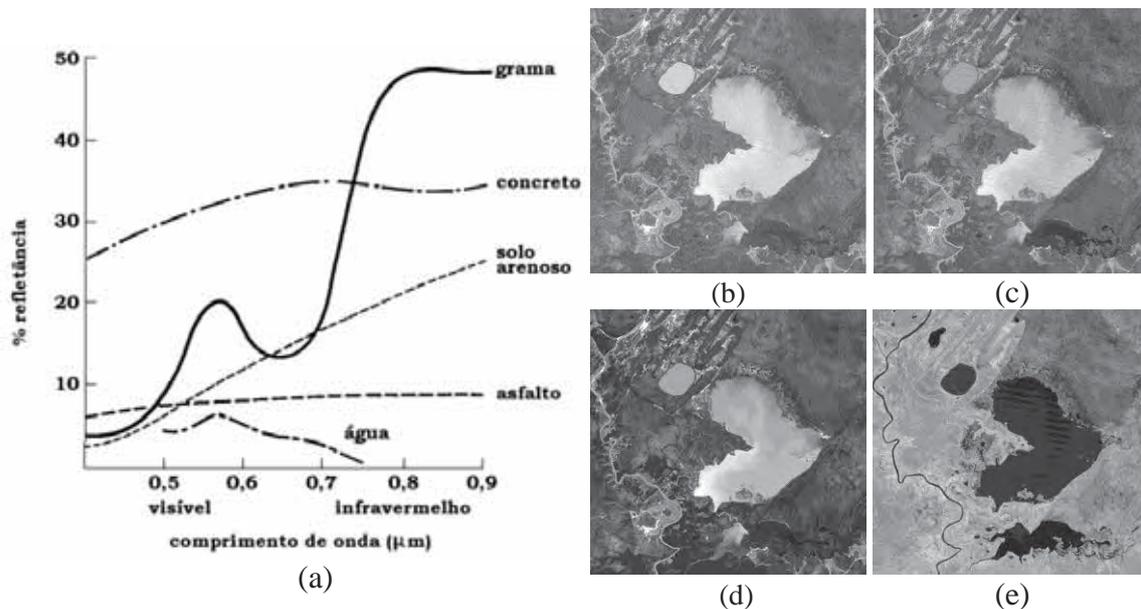
---

## **2.1 Sensoriamento Remoto**

Segundo Florenzano (2002), Sensoriamento Remoto (SR) é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. Para Novo (2008), os sistemas sensores são definidos como qualquer equipamento capaz de transformar a radiação eletromagnética em um sinal que possa ser convertido em informações sobre o meio ambiente. As imagens digitais obtidas por sensores a bordo de satélites, aeronaves ou em nível terrestre são armazenadas como matrizes cujo elemento principal é o pixel (contração dos termos *picture element*). Cada pixel apresenta um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente ao tamanho do elemento de resolução espacial do sensor considerado. Portanto, essas imagens representam formas de captura indireta da informação espacial.

De acordo com Novo (2008), os diferentes sistemas sensores são caracterizados por suas resoluções *espacial*, *espectral*, *radiométrica* e *temporal*. A resolução espacial é a medida da menor separação linear ou angular entre dois objetos da superfície terrestre que o sensor é capaz de detectar; a resolução espectral é definida como a quantidade e largura das faixas espectrais para as quais o sensor apresenta sensibilidade; a resolução radiométrica tem relação com a capacidade do sensor de diferenciar dois níveis de intensidade do sinal de retorno; e a resolução temporal se refere ao intervalo de tempo entre a aquisição de duas imagens de uma mesma área.

A principal característica do Sensoriamento Remoto é o seu poder de multiespectralidade, ou seja, a característica de obter dados de uma área a partir de várias faixas do espectro eletromagnético. Os alvos contidos na cena, no que diz respeito às interações entre energia e matéria, costumam se comportar de maneira diferente de acordo com os comprimentos de onda incidentes. Esta variação de resposta do alvo aos diversos comprimentos de onda da energia eletromagnética é conhecida como comportamento espectral do alvo. Este pode ser definido como a medida da reflectância do alvo ao longo do espectro eletromagnético. O conhecimento acerca do comportamento espectral dos alvos e dos fatores que podem interferir nele é de suma importância para a melhoria na utilização dos sistemas existentes, como também, na definição e construção dos novos sistemas sensores. A Figura 1(a) mostra curvas de reflectância para diversos alvos, no espectro eletromagnético variando do azul ao infravermelho próximo.



**Figura 1:** Comportamento espectral de alvos.  
 Fonte: disponível em: <<http://www.ltid.inpe.br/dsr/mauricio/sensores.htm>>  
 Acesso em: jan. 2009.

Na Figura 1(a) o eixo horizontal é definido pelos comprimentos de onda enquanto o eixo vertical é definido pelo fator de reflectância dos alvos. O fator de reflectância de um objeto é a razão entre a medida de radiância do objeto e a radiância de uma superfície lambertiana ideal, sendo estas radiâncias obtidas nas mesmas condições de iluminação e observação (MILTON, 1987). Ao se analisar a Figura 1(a) percebe-se, por exemplo, que a água com poucos sedimentos possui uma resposta muito baixa para os comprimentos de onda na região do visível, e que na região do infravermelho próximo aparecerá totalmente escura nas imagens multiespectrais. Já a vegetação apresenta sua maior resposta no infravermelho próximo e respostas mais baixas nas faixas do azul e vermelho. O solo arenoso tem resposta espectral crescente a partir do azul em direção ao infravermelho e, portanto, apresentam-se com tonalidade mais clara nas faixas do vermelho e infravermelho que nas faixas do azul e verde. As demais imagens mostradas na Figura 1 foram obtidas pelo sensor ETM+ do Landsat 7, nas bandas do azul (a), verde (b), vermelho (c) e infravermelho próximo (d). Raciocínios semelhantes podem ser feitos para os demais alvos. Mais informações sobre Sensoriamento Remoto e comportamento espectral de alvos podem ser encontradas em Moreira (2001), Meneses (2001) e Jensen (2009).

## **2.2 Processamento Digital de Imagens**

Segundo Lillesand e Kiefer (2007), o Processamento Digital de Imagens (PDI), envolve a manipulação e a interpretação de imagens digitais com o auxílio de um computador. O PDI teve seu início, propriamente dito, na década de sessenta, quando um número limitado de pesquisadores começou a analisar dados espectrais aerotransportados e fotografias aéreas digitalizadas. Entretanto, só após o lançamento do satélite Landsat 1, em 1972, é que os dados de imagens digitais orbitais tornaram-se extensamente disponíveis para aplicações de Sensoriamento Remoto. Nesta época, o custo de computadores digitais era muito elevado e sua eficiência computacional era muito baixa para padrões modernos. Atualmente, a diminuição sistemática nos custos dos computadores, ocasionada pelo desenvolvimento super acelerado da área, tem ampliado o desenvolvimento de técnicas de PDI.

O interesse em métodos para processamento de imagens digitais decorre de duas áreas principais de aplicação: melhoria na informação visual para a interpretação humana e o processamento de dados de cenas para o reconhecimento automático dos alvos presentes nelas (GONZALEZ e WOODS, 2000).

A idéia principal do PDI é relativamente simples. A imagem digital é formada no computador por uma matriz de pixels, e, sobre esta, são desenvolvidas todas as transformações. Em geral, os resultados dessas transformações produzem uma nova imagem digital que pode ser visualizada, gravada em formato pictorial ou pode ser manipulada por programas adicionais. As possíveis formas de manipulação da imagem digital são literalmente infinitas. Entretanto, virtualmente, todos estes procedimentos podem ser categorizados em um (ou mais) dos seguintes quatro extensos tipos de operações auxiliadas por computador (LILLESAND e KIEFER, 2007):

- Retificação e restauração de imagens: estas operações objetivam corrigir as distorções ou dados degradados da imagem para criar uma representação mais fiel da cena. Isto envolve tipicamente o processamento inicial dos dados brutos da imagem para corrigir as distorções geométricas, calibrar radiometricamente os dados e eliminar ruídos presentes nos dados;
- Realce de imagens: estes procedimentos são aplicados na imagem com a finalidade de melhorar a visualização ou gravação dos dados para subseqüentes interpretações

visuais. Normalmente, o realce de imagens envolve técnicas que aumentam a distinção visual entre os alvos presentes na cena;

- Classificação de imagens: o objetivo desta operação é substituir a análise visual dos dados por técnicas quantitativas para automatizar a identificação dos alvos em uma cena. Isto envolve, normalmente, a análise de imagens multiespectrais e a aplicação pode ser baseada em regras estatísticas para determinar a identidade dos alvos presentes na cena;
- Fusão de dados: este processo é usado para agrupar dados oriundos de fontes de informação diferentes, com o objetivo de gerar uma imagem que reúna as melhores características espectrais e espaciais dentre as imagens disponíveis, ou integrar níveis de informação diferentes, como por exemplo, imagens orbitais com fotografias aéreas.

Uma imagem digital monocromática pode ser definida da seguinte maneira:

**Definição 1:** Seja  $E$  um conjunto não vazio de quadrados adjacentes dispostos em linhas e colunas, formando uma superfície retangular. Seja  $\mathcal{K}$  um conjunto de níveis de cinza. Uma imagem em tons de cinza é um mapeamento  $E \rightarrow \mathcal{K}$ . Usualmente,  $\mathcal{K}$  pode ser entendido como um intervalo  $[0, k_{máx}]$  em  $\mathbb{Z}$  com  $E \in \mathbb{Z}^2$ . Se  $\mathcal{K}$  é o conjunto  $\{0, 1\}$  então a imagem é dita binária.

Nota-se pela definição 1 que uma imagem digital é uma representação aproximada da realidade, resultante de um processo de *discretização* espacial e de intensidade. O conjunto  $E$  é o produto da discretização espacial, ou do suporte da imagem, processo conhecido pelo nome de *amostragem*, e  $\mathcal{K}$  é originado pela discretização dos valores de intensidade, ou seja, por um processo de *quantização*. Uma definição complementar de imagem digital é apresentada por Gonzalez e Woods (2000):

**Definição 2:** Uma imagem é uma função de intensidade luminosa bidimensional, denotada por  $f(x, y)$ , cujo valor ou amplitude nas coordenadas espaciais  $(x, y)$  fornece o brilho da imagem naquele ponto. Como a luz é uma forma de energia,  $f(x, y)$  deve ser maior que zero e finita:

$$0 < f(x, y) < \infty. \quad (1)$$

Considerando-se as imagens cujo processo de formação depende exclusivamente da energia eletromagnética refletida pelos alvos, os autores ressaltam que a natureza básica de  $f(x, y)$  pode ser caracterizada por duas componentes: a quantidade de energia eletromagnética incidente sobre a cena e a quantidade que é refletida por esta. Estas componentes são chamadas de *iluminação* e *reflectância* e são denotadas, respectivamente, por  $i(x, y)$  e  $r(x, y)$ . Portanto é possível representar  $f(x, y)$  da seguinte maneira:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y). \quad (2)$$

Em que iluminação e reflectância assumem valores nos intervalos  $(0, \infty)$  e  $(0, 1)$ , respectivamente. Se  $(x, y) \in \mathbb{Z}^2$  e  $f(x, y) \in \mathbb{Z}$  então  $f$  é uma imagem digital.

Cada imagem possui um sistema de coordenadas próprio, o *sistema de coordenadas de imagem*, com origem no pixel do canto superior esquerdo da cena. Normalmente, cada pixel é endereçado pelas coordenadas de seu centro, em valores de *linha* e *coluna*, de acordo com sua posição dentro da matriz, conforme a Figura 2.

		Colunas →					
Linhas	56	55	55	57	54		
↓	55	55	57	55	55	Pixel (2, 2)	
	78	81	81	82	80		
	80	82	79	78	77		
	82	82	84	84	85		

**Figura 2:** Sistema de coordenadas de imagem.

Um problema fundamental em análise de imagens é a escolha adequada da transformação a ser aplicada na resolução de um dado problema. Por isso é importante conhecer as propriedades básicas das transformações. De acordo com Serra (1982), Barrera (1987) e Soille (2004) algumas delas são:

**Definição 3:** Uma transformação  $\Psi$  é *invariante a translações* se ela comuta com as translações da imagem.

$$\Psi \text{ é invariante a translações } \Leftrightarrow \forall f, \forall b, \Psi(f_b) = [\Psi(f)]_b. \quad (3)$$

Em que  $f_b$  é a translação de  $f$  pelo vetor  $b$ . Assim, o valor da imagem transladada num dado pixel  $x$  é igual ao valor da imagem original na posição transladada pelo vetor  $b$ :

$$f_b(x) = f(x+b). \quad (4)$$

Na equação 3 a translação se dá apenas pelo domínio da imagem, mas pode-se definir também uma translação  $k$  pelo seu contradomínio (comumente chamada de *offset*):

$$(f_b + k)(x) = f(x+b) + k. \quad (5)$$

Note-se que, a não ser quando especificado de maneira diferente,  $x, b \in \mathbb{Z}^2$  e  $k \in \mathbb{Z}$ .

Invariância a translações é um critério importante nas aplicações de PDI em imagens de Sensoriamento Remoto. Por exemplo, ao se obter duas imagens com a câmera assumindo posições diferentes, mas permitindo que haja uma região de sobreposição entre as duas cenas, é desejável que uma transformação obtenha exatamente o mesmo resultado para as duas imagens na área em que houve a sobreposição.

**Definição 4:** A transformação  $\Psi$  é *invariante a rotações* se ela comuta com as rotações  $\Theta$  das imagens:

$$\Psi \text{ é invariante a rotações } \Leftrightarrow \Psi\Theta = \Theta\Psi. \quad (6)$$

Esta propriedade nem sempre é desejável, especialmente quando se busca analisar estruturas da imagem em uma determinada orientação.

A representação de conjunto para imagens em tons de cinza é feita considerando-se seus subgrafos. O subgrafo de uma imagem  $n$ -dimensional é um conjunto  $(n+1)$ -D (em que

D especifica a dimensão). Entretanto, subgrafos não são conjuntos em um espaço homogêneo uma vez que as unidades do plano da imagem são comumente diferentes das unidades dos tons de cinza. Portanto a escala dos subgrafos dependerá do fator de ampliação da imagem e do intervalo dinâmico dos tons de cinza. A caracterização do comportamento de transformações aplicadas sob escalas independentes de tons de cinza e para as unidades do plano da imagem é feita pela propriedade de *dimensionalidade*.

**Definição 5:** A transformação  $\Psi$  é dimensional para escalas desconhecidas  $\Lambda$  do plano da imagem se ela comuta com tais escalas:

$$\Psi \text{ é dimensional para } \Lambda \text{ desconhecidas} \Leftrightarrow \Psi\Lambda = \Lambda\Psi. \quad (7)$$

Além disso,  $\Psi$  é dimensional para escalas desconhecidas  $\Lambda$  de níveis de cinza se ela comuta com as tais escalas ou se é invariante às mesmas:

$$\Psi \text{ é dimensional para } \Lambda \text{ desconhecidas} \Leftrightarrow \Psi\Lambda = \Lambda\Psi \text{ ou } \Psi\Lambda = \Psi. \quad (8)$$

Transformações dimensionais que satisfazem as equações 7 e 8 são importantes em situações em que os parâmetros de captura das imagens se alteram.

Uma vez que o domínio de uma imagem discreta é apenas uma amostra de uma cena maior, podem ocorrer problemas ao longo das bordas da imagem quando aplicada uma transformação que se baseie em uma operação de vizinhança. A propriedade de *conhecimento local* diz respeito à definição de um subconjunto do plano da imagem amostrada onde não há efeitos de borda.

**Definição 6:** A transformação  $\Psi$  satisfaz a propriedade de conhecimento local quando existe um subconjunto  $D'$  do domínio  $D$  da imagem, de maneira que a transformação aplicada a qualquer imagem  $f$  restrita a  $D$  e posteriormente restrita a  $D'$  é equivalente a se aplicar a transformação à imagem definida sobre o plano todo e então restringir o resultado a  $D'$ :

$$\Psi(f | D) | D' = \Psi(f) | D'. \quad (9)$$

**Definição 7:** Uma transformação  $\Psi$  é *idempotente* se o resultado de sua aplicação repetida é igual ao resultado da primeira aplicação:

$$\Psi \text{ é idempotente} \Leftrightarrow \Psi\Psi = \Psi. \quad (10)$$

**Definição 8:** Uma transformação  $\Psi$  é *extensiva* se para todas as imagens  $f$  a imagem transformada é maior ou igual à imagem original, isso é, se  $\Psi$  é maior ou igual à transformação identidade  $I$ :

$$\Psi \text{ é extensiva} \Leftrightarrow I \leq \Psi. \quad (11)$$

Vale ressaltar que uma imagem  $f$  é menor ou igual a uma imagem  $g$  se para todo ponto do domínio comum às duas imagens o valor de  $f$  é menor ou igual ao valor  $g$ :

$$f \leq g \Leftrightarrow \forall x \in D(f) \cap D(g), f(x) \leq g(x). \quad (12)$$

O mesmo raciocínio se estende às transformações. A multiplicação, por exemplo, de uma imagem por um valor inteiro positivo é uma operação extensiva. Transformações extensivas são muitas vezes combinadas com diferenças aritméticas. Estas diferenças entre a imagem transformada e a imagem original são sempre positivas e produzem uma imagem cujos pixels com altos valores de intensidade sofrem uma substancial modificação enquanto aqueles com valor de intensidade zero não são afetados. Se a transformação foi aplicada para modificar determinados objetos da imagem enquanto mantêm outros inalterados, a imagem resultante da diferença pode ser usada para discriminar os objetos modificados.

**Definição 9:** Uma transformação  $\Psi$  é *anti-extensiva* se para todas as imagens  $f$  a imagem transformada é menor ou igual à imagem original:

$$\Psi \text{ é anti-extensiva} \Leftrightarrow I \geq \Psi. \quad (13)$$

A divisão de uma imagem por um valor inteiro positivo é uma operação anti-extensiva.

**Definição 10:** Uma transformação  $\Psi$  é *crescente* se ela preserva a relação de ordem entre as imagens:

$$\Psi \text{ é crescente} \Leftrightarrow \forall f, g, f \leq g \Rightarrow \Psi(f) \leq \Psi(g). \quad (14)$$

Um operador crescente definido para imagens binárias pode ser diretamente estendido a imagens em tons de cinza usando o princípio de sobreposição de limiares. Considere, por exemplo, um operador que remova todos componentes conectados cuja área seja menor que um determinado limiar. Este operador é crescente e pode ser estendido a imagens em tons de cinza ao ser aplicado a cada seção transversal (ver definição 36) da imagem.

**Definição 11:** Duas transformações  $\Psi$  e  $\Phi$  são *duais* com respeito a seus complementos se a aplicação de  $\Psi$  a uma imagem é equivalente a aplicar  $\Phi$  ao complemento da referida imagem e obter o complemento do resultado:

$$\Psi \text{ e } \Phi \text{ são duais com respeito a seus complementos } C \Leftrightarrow \Psi = C\Phi C. \quad (15)$$

Em que  $C$  é o operador de complemento definido como  $C(f) = f^C(x) = k_{\text{máx}} - f(x)$ .

Algumas ou todas as propriedades de uma transformação são herdadas diretamente de sua transformação dual, como por exemplo:

$$\Phi \text{ idempotente} \Rightarrow \Psi \text{ idempotente}$$

$$\Phi \text{ extensiva} \Rightarrow \Psi \text{ anti-extensiva}$$

$$\Phi \text{ anti-extensiva} \Rightarrow \Psi \text{ extensiva}$$

$$\Phi \text{ crescente} \Rightarrow \Psi \text{ crescente.}$$

**Definição 12:** Uma transformação  $\Psi$  é *auto-dual* com respeito a seu complemento se sua transformação dual, também com respeito a seu complemento, é a própria  $\Psi$ :

$$\Psi \text{ é auto-dual com respeito ao complemento } C \Leftrightarrow \Psi = C\Psi C. \quad (16)$$

Como exemplo de transformação *auto-dual* pode-se citar o filtro de mediana, bem como filtros lineares invariantes a translação.

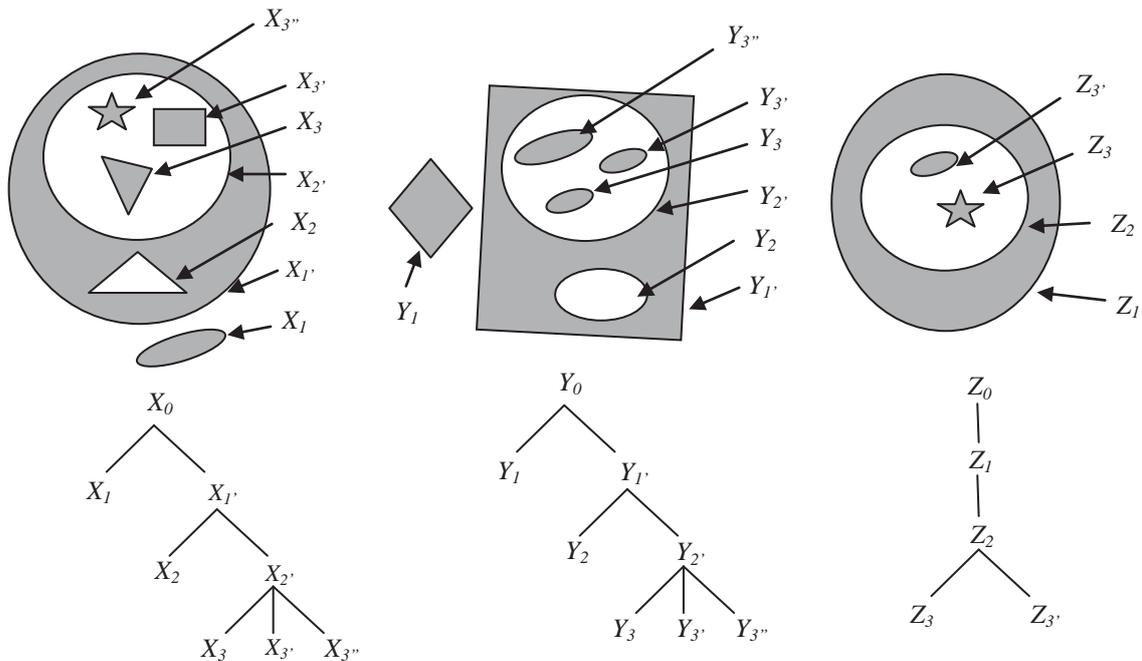
**Definição 13:** Dois operadores são *complementares* se, e apenas se, a aplicação do primeiro a uma imagem é equivalente a aplicação do segundo ao complemento da tal imagem:

$$\Phi = \Psi C. \tag{17}$$

**Definição 14:** Se um operador é seu próprio operador complementar, então ele satisfaz a propriedade de *auto-complementaridade*.

$$\Phi = \Phi C. \tag{18}$$

**Definição 15:** A *árvore de homotopia* de um conjunto limitado  $X$  tem como raiz  $X_0$ , que corresponde a um componente conectado não limitado de  $X^C$ ; o primeiro nível de ramificações corresponde aos componentes  $X_{1i}$  de  $X$ , adjacentes a  $X_0$ ; o segundo nível corresponde aos componentes  $X_{2i}$  de  $X^C$  adjacentes a cada  $X_{1i}$ , etc. A Figura 3 exemplifica alguns componentes conectados e suas respectivas árvores de homotopia.



**Figura 3:** Conjuntos e suas respectivas árvores de homotopia.

Fonte: adaptada de SOILLE (1999).

Dois conjuntos são homotópicos se suas árvores de homotopia são idênticas. Na Figura 3 os conjuntos  $X$  e  $Y$  são homotópicos. Uma transformação  $\Psi$  é homotópica se, para todos os conjuntos  $X$ ,  $\Psi(X)$  tem a mesma homotopia de  $X$ .

Como a resolução do sistema sensor é finita, e é possível a ocorrência de flutuações na representação dos alvos, o ideal é que as transformações não sejam sensíveis aos detalhes mais finos dos alvos estudados e devam, portanto, atender a propriedade de *semi-continuidade*.

**Definição 16:** A propriedade de semi-continuidade implica que, para toda transformação crescente  $\Psi$  e qualquer seqüência decrescente de conjuntos fechados  $X_i$  tendendo a um limite  $\Delta$ , a seqüência de conjuntos transformados  $\Psi(X_i)$  deve tender a  $\Psi(\Delta)$ :

$$\left. \begin{array}{l} X \subseteq Y \rightarrow \Psi(X) \subseteq \Psi(Y) \\ X_i \downarrow \Delta \end{array} \right\} \Rightarrow \Psi(X_i) \downarrow \Psi(\Delta). \quad (19)$$

Essa condição garante que sejam obtidos resultados semelhantes para transformações de objetos de formas próximas.

### 2.2.1 Binarização de imagens

Aplicações de PDI para realce de imagens podem ser divididas, de uma maneira bem geral, em *operações pontuais* e *operações baseadas em vizinhança*. Operações pontuais envolvem basicamente operações aritméticas com imagens e a manipulação de seus histogramas. Nas operações de vizinhança o valor de um pixel transformado leva em conta a informação de brilho de seus vizinhos. O histograma de uma imagem em tons de cinza é um indicador do número de vezes que cada tom de cinza ocorre na imagem. A amplitude do histograma depende da resolução radiométrica da imagem. Esta é definida como a quantidade de níveis de cinza utilizados por um sensor na formação de suas imagens.

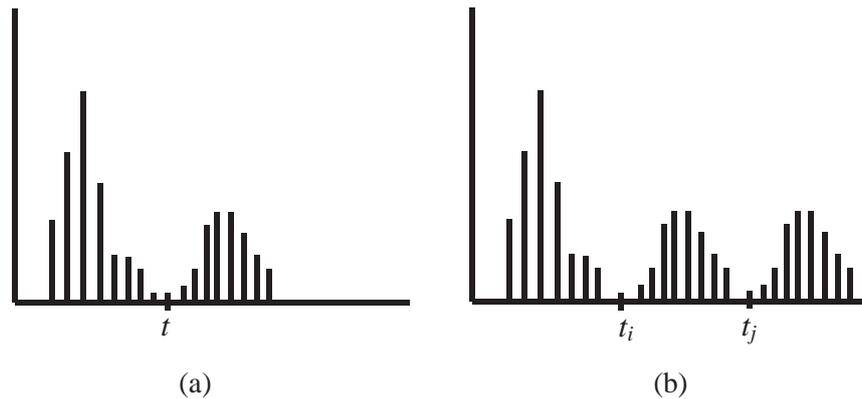
**Definição 17:** O histograma de uma imagem com tons de cinza no intervalo  $[0, k_{máx}]$  é uma função discreta  $h(k) = n_k$ , em que  $k$  é o  $k$ -ésimo nível de cinza e  $n_k$  é o número de pixels na imagem com o tom de cinza  $k$ .

O processo de *binarização* de uma imagem monocromática consiste no mapeamento de seus tons de cinza para o conjunto  $\{0, 1\}$ , em que 0 (zero) denota a cor preta e 1 (um) denota a cor branca. Este mapeamento é feito com base em um limiar  $t$ , geralmente definido a partir da análise do histograma.

**Definição 18:** Uma binarização é uma transformação  $\mathcal{T}$  que mapeia os tons de cinza de  $f$  em  $\{0,1\}$ . Então se pode escrever:

$$\mathcal{T}(f) = \begin{cases} 0, & \text{se } f \leq t \\ 1, & \text{se } f > t \end{cases} . \quad (20)$$

A transformação  $\mathcal{T}$  é bastante útil na segmentação de imagens, especialmente nos casos em que os pixels relevantes e de fundo se agrupam ao redor de dois picos (valores mais frequentes) bem distintos no histograma, como na Figura 4(a).



**Figura 4:** Histogramas com dois (a) e três (b) picos.

Uma maneira de segmentar os dois grupos de pixels é aplicar uma binarização com um limiar  $t$  que separe os dois picos. A Figura 4(b) mostra uma situação mais geral em que o histograma apresenta três picos e, portanto, a aplicação de um único limiar pode não ser

suficiente se os pixels de interesse se concentrarem, por exemplo, entre os limiares  $t_i$  e  $t_j$ . Neste caso é preciso fazer uma modificação na definição da transformação  $\mathcal{T}$  :

**Definição 19:** Uma *binarização multi-limiar* é uma transformação  $\mathcal{T}$  que mapeia os tons de cinza de  $f$  em  $\{0, 1\}$  com base nos limiares  $t_i$  e  $t_j$ :

$$\mathcal{T}_{[t_i, t_j]}(f) = \begin{cases} 1, & \text{se } t_i \leq f \leq t_j \\ 0, & \text{se outro} \end{cases}. \quad (21)$$

As definições 20 e 21 baseiam-se apenas na informação de brilho da imagem, portanto são binarizações ditas *globais*.

O sucesso das transformações de binarização depende da escolha do limiar  $t$ . Esta escolha é relativamente simples quando a imagem estudada possui um histograma semelhante ao mostrado na Figura 4(a), mas em algumas situações a escolha não é tão clara. O problema é que geralmente os histogramas de pixels relevantes e de pixels de fundo se sobrepõem e, além disso, determinar o limiar empiricamente é uma tarefa que custa tempo. Nestes casos pode-se utilizar algum tipo de método automático para definição do limiar, como por exemplo, o *método de Otsu* (OTSU, 1979; GONZALEZ, WOODS e EDDINS, 2003; MCANDREW, 2004). Ele considera o histograma de uma imagem como uma distribuição de probabilidade:

$$p_k = n_k / N. \quad (22)$$

Em que  $n_k$  é o número de pixels com tom de cinza  $k$ ,  $N$  é o total de pixels e, portanto,  $p_k$  é a probabilidade de um pixel apresentar o tom  $k$ .

Se for aplicada uma binarização com limiar  $t$ , agrupando os pixels de uma imagem em duas classes  $C_0$  e  $C_1$ , então as probabilidades de ocorrência de cada uma das classes são dadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sum_{k=0}^t p_k \\ \omega_1 &= \sum_{k=t+1}^{k_{\max}} p_k \end{aligned}. \quad (23)$$

Em que  $k_{máx}$  é o maior nível de cinza segundo a resolução radiométrica da imagem e, por definição,  $\omega_0 + \omega_1 = 1$ .

As médias ( $\mu_0, \mu_1$ ) e variâncias ( $\sigma_0^2, \sigma_1^2$ ) das classes  $C_0$  e  $C_1$  são calculadas como:

$$\begin{aligned}\mu_0 &= \sum_{k=0}^k k p_k / \omega_0 \\ \mu_1 &= \sum_{k=t+1}^{k_{máx}} k p_k / \omega_1\end{aligned}\quad (24)$$

$$\begin{aligned}\sigma_0^2 &= \sum_{k=0}^k (k - \mu_0)^2 p_k / \omega_0 \\ \sigma_1^2 &= \sum_{k=t+1}^{k_{máx}} (k - \mu_1)^2 p_k / \omega_1\end{aligned}\quad (25)$$

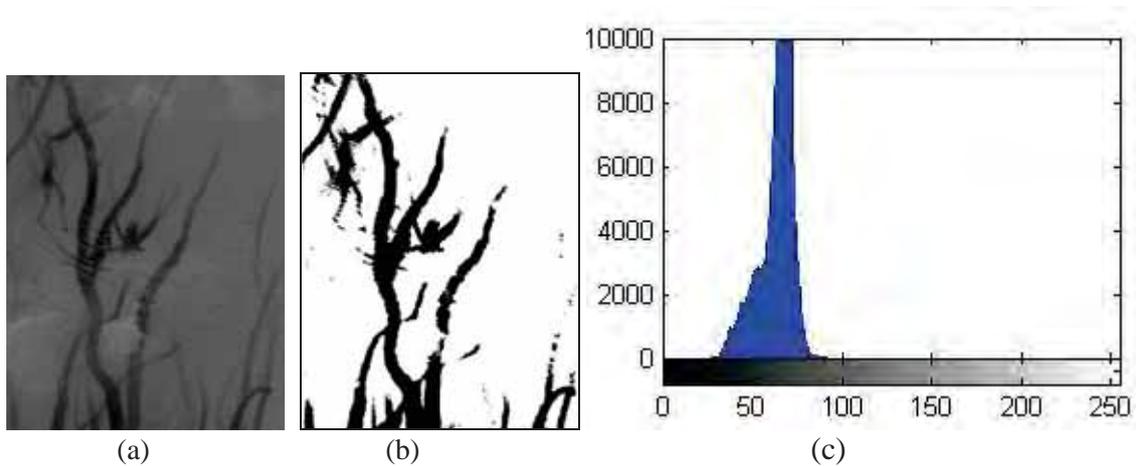
Com base nas equações 23 a 25 são definidas as seguintes medidas de separabilidade entre as classes:

$$\begin{aligned}\sigma_W^2 &= \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \\ \sigma_B^2 &= \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2\end{aligned}\quad (26)$$

Em que  $\sigma_W^2$  e  $\sigma_B^2$  são as variâncias *intraclasse* e *interclasse*, respectivamente.

O objetivo é, então, encontrar um  $t$  que maximize a variância interclasse ou que minimize a variância intraclasse. Em outras palavras, o algoritmo de Otsu testa todos os limiares possíveis e calcula uma medida de espalhamento para os pixels em cada classe  $C_0$  e  $C_1$ . O limiar ideal é aquele que minimiza o espalhamento das classes.

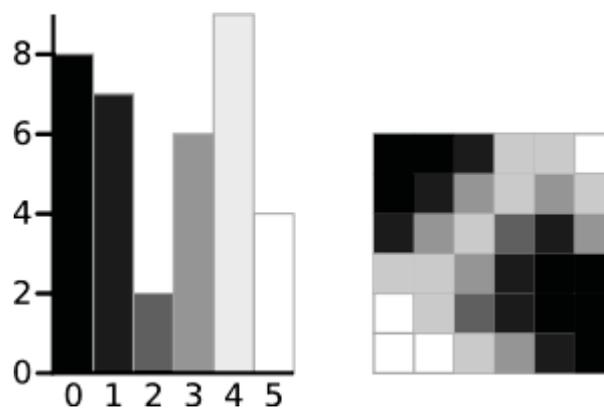
Como exemplo, a Figura 5(a) mostra uma imagem em tons de cinza, com seu histograma em 5(b). A binarização pelo método de Otsu é mostrada em (c) e o limiar gerado automaticamente foi 58.



**Figura 5:** Binarização automática pelo método de Otsu: imagem original (a), imagem binarizada (b) e histograma da imagem original (c).

Fonte: NASA/JPL/MSSS.

O próximo exemplo de aplicação do método de Otsu está disponível em <http://www.labbookpages.co.uk/software/imgProc/otsuThreshold.html>, acesso em mar. 2010. A Figura 6, a seguir, é considerada. Nela é mostrada uma imagem de tamanho 6 x 6 formada por 6 níveis de cinza.



**Figura 6:** Imagem usada para demonstrar o exemplo numérico do método de Otsu.

Fonte: <http://www.labbookpages.co.uk/software/imgProc/otsuThreshold.html>.

Acesso em: mar. 2010.

Tomando-se como limiar  $t$  o nível 3, os cálculos para encontrar as estatísticas dos pixels de fundo e dos pixels relevantes são:

$$\text{Probabilidade da classe de pixels de fundo: } \omega_0 = \frac{8+7+2}{36} = 0,4722 .$$

$$\text{Média da classe de fundo: } \mu_0 = \frac{(0 \times 8) + (1 \times 7) + (2 \times 2)}{17} = 0,6471 .$$

$$\begin{aligned} \text{Variância do fundo: } \sigma_0^2 &= \frac{((0-0,6471)^2 \times 8) + ((1-0,6471)^2 \times 7) + ((2-0,6471)^2 \times 2)}{17} \\ &= 0,4637. \end{aligned}$$

$$\text{Probabilidade da classe de pixels relevantes: } \omega_1 = \frac{6+9+4}{36} = 0,5278 .$$

$$\text{Média dos pixels relevantes: } \mu_1 = \frac{(3 \times 6) + (4 \times 9) + (5 \times 4)}{19} = 3,8947 .$$

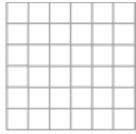
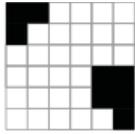
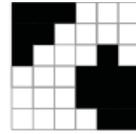
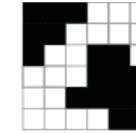
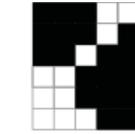
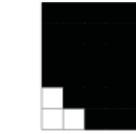
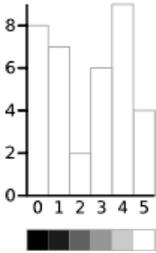
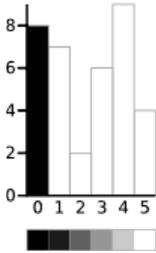
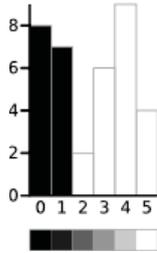
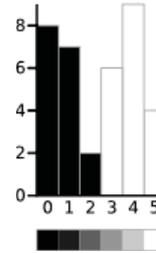
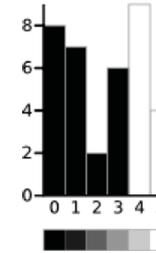
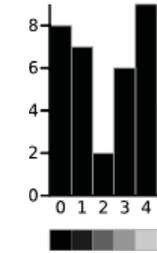
$$\begin{aligned} \text{Variância de pixels relevantes: } \sigma_1^2 &= \frac{((3-3,8947)^2 \times 6) + ((4-3,8947)^2 \times 9) + ((5-3,8947)^2 \times 4)}{19} \\ &= 0,5152. \end{aligned}$$

$$\text{Variância intraclasse: } \sigma_w^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 = 0,4909 .$$

O mesmo cálculo é feito para todos os possíveis limiares (0 a 5) e aquele a partir do qual se originar a menor variância intraclasse é escolhido como ideal. A Tabela 1 mostra os cálculos para todos os valores de cinza da Figura 6. De acordo com o exemplo, o limiar que produziu o menor valor de espalhamento entre as classes foi  $t = 3$ . Portanto este é o limiar eleito como ideal para binarização da imagem original. O método também pode ser estendido a binarizações com dois limiares (definição 19). Maiores detalhes e exemplos de aplicação são apresentados em Otsu (1979). Outros métodos equivalentes para binarização automática podem ser encontrados em Kapur, Sahoo e Wong (1985), Niblack (1986), Trier e Taxt (1995), Sauvola et al. (1997), Wolf, Jolion e Chassaing (2002), Wu e Amin (2003) e Lopes (2003).

A iluminação da cena tem um papel importante na binarização global, podendo dificultar bastante a determinação adequada do limiar  $t$ . A Figura 7(a) mostra uma imagem manipulada por computador formada apenas pela função de reflectância  $r(x, y)$ , sem influência de uma função de iluminação  $i(x, y)$  (equação 2). A Figura 7(b) exhibe o histograma da imagem original, claramente bimodal, o que torna fácil a escolha de um limiar para separar os pixels relevantes dos pixels de fundo.

Tabela 1: Determinação automática de limiar pelo método de Otsu.

$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$
					
					
$\omega_0 = 0$	$\omega_0 = 0,222$	$\omega_0 = 0,4167$	$\omega_0 = 0,4722$	$\omega_0 = 0,6389$	$\omega_0 = 0,8889$
$\mu_0 = 0$	$\mu_0 = 0$	$\mu_0 = 0,4667$	$\mu_0 = 0,6471$	$\mu_0 = 1,2609$	$\mu_0 = 2,0313$
$\sigma^2_0 = 0$	$\sigma^2_0 = 0$	$\sigma^2_0 = 0,2489$	$\sigma^2_0 = 0,4637$	$\sigma^2_0 = 1,4102$	$\sigma^2_0 = 2,5303$
$\omega_1 = 1$	$\omega_1 = 0,7778$	$\omega_1 = 0,5833$	$\omega_1 = 0,5278$	$\omega_1 = 0,3611$	$\omega_1 = 0,1111$
$\mu_1 = 2,3611$	$\mu_1 = 3,0357$	$\mu_1 = 3,7143$	$\mu_1 = 3,8947$	$\mu_1 = 4,3077$	$\mu_1 = 5,000$
$\sigma^2_1 = 3,1196$	$\sigma^2_1 = 1,9639$	$\sigma^2_1 = 0,7755$	$\sigma^2_1 = 0,5152$	$\sigma^2_1 = 0,2130$	$\sigma^2_1 = 0$
$\sigma^2_w = 3,1196$	$\sigma^2_w = 1,5268$	$\sigma^2_w = 0,5561$	$\sigma^2_w = \mathbf{0,4909}$	$\sigma^2_w = 0,9779$	$\sigma^2_w = 2,2491$

Fonte: <<http://www.labbookpages.co.uk/software/imgProc/otsuThreshold.html>>. Acesso em: mar. 2010.

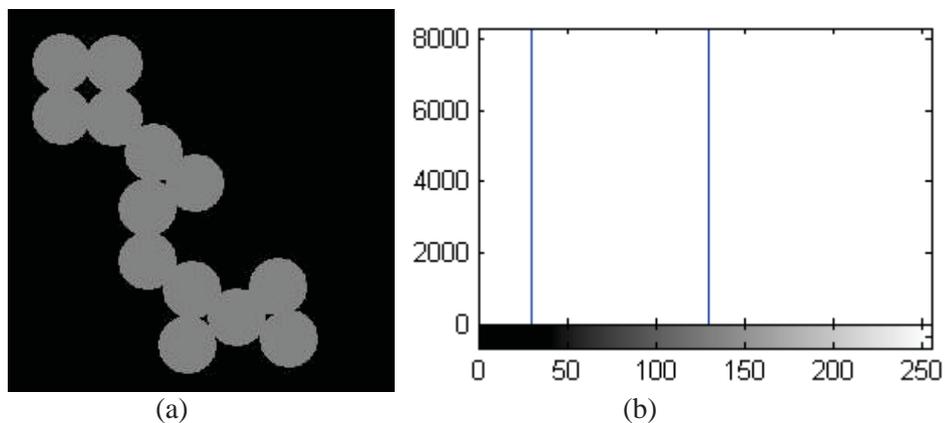
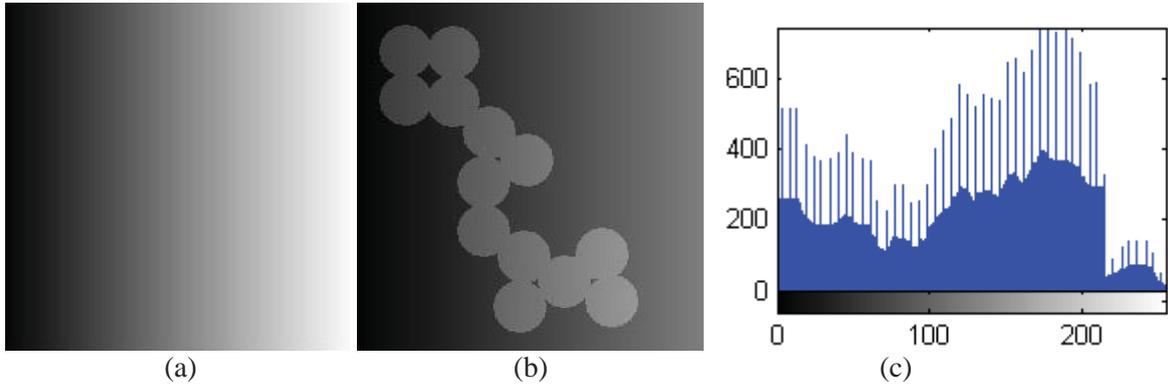


Figura 7: Imagem gerada somente por uma função de reflectância (a) e seu histograma (b).

Fonte: adaptada de MATLAB (2008).

Ao se multiplicar a função de reflectância pela função de iluminação, mostrada na Figura 8(a), gera-se a imagem na Figura 8(b). Agora, é impossível escolher um limiar baseado puramente em seu histograma, mostrado em (c), para separar adequadamente a informação relevante do fundo (GONZALEZ e WOODS, 2000).



**Figura 8:** Influência da função de iluminação na binarização de imagens.

Fonte: adaptada de MCANDREW (2004).

Para Gonzales e Woods (2000) a distorção no histograma exibido na Figura 8(c) pode ser explicada com base na equação 2. O logaritmo natural desta equação permite entender a formação do histograma de uma imagem como um processo de *convolução*:

$$\begin{aligned}
 s(x, y) &= \ln f(x, y) \\
 &= \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \\
 &= i'(x, y) + r'(x, y).
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Da teoria da probabilidade, se  $i'$  e  $r'$  são variáveis aleatórias independentes, o histograma de  $s$  é dado pela convolução dos histogramas de  $i'$  e  $r'$ . Se  $i(x, y)$  for constante então  $i'(x, y)$  também é e seu histograma é um pico, como na Figura 7(b). E se a convolução entre os histogramas de  $i'$  e  $r'$  fosse feita, o histograma resultante seria idêntico ao de  $r'$ . O mesmo não ocorreria no caso de uma iluminação não uniforme, em que o histograma de  $i'$  não seria mais um pico. Então, a forma do histograma de  $s$  poderia ser muito diferente da forma do histograma de sua função de iluminação (Figura 8(c)). Quando a fonte de iluminação está disponível, uma solução frequentemente usada na prática para compensar sua não uniformidade é projetar o padrão de iluminação em uma superfície constante, clara e refletiva. Isto produz uma imagem  $g(x, y) = ci(x, y)$ , em que  $c$  é uma constante que depende da

superfície. Assim, para uma dada imagem  $f(x, y) = i(x, y)r(x, y)$  a divisão de  $f$  por  $g$  resulta em uma função normalizada:

$$\begin{aligned}fn(x, y) &= f(x, y) / g(x, y) \\ &= r(x, y) / c.\end{aligned}\tag{28}$$

Dessa maneira, se  $r$  pode ser segmentada por um limiar  $t$  simples, então  $h$  pode ser segmentada por um limiar  $t/c$ . Outra maneira de se eliminar a influência da função de iluminação é a utilização de filtros morfológicos de abertura ou fechamento, apresentados nas definições 31 e 32.

### 2.2.2 Morfologia Matemática

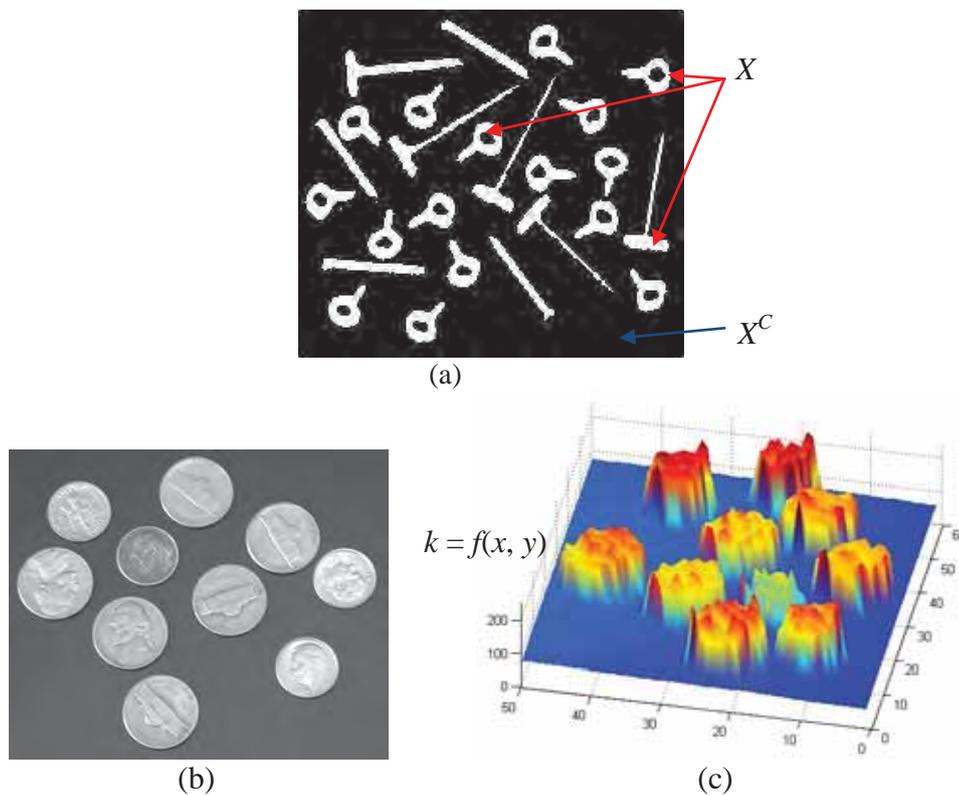
Segundo Banon e Barrera (1998), por volta de 1964, na *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*, em *Fontainebleau*, George Matheron e Jean Serra decidiram experimentar uma abordagem singular para resolver problemas de análise de imagens: extrair informações de imagens a partir de transformações de formas, realizadas através de dois operadores (ou transformações) elementares que eles denominaram *dilatação* e *erosão*.

Tais operadores foram criados a partir de noções de *soma* e *subtração* de *Minkowski*. As transformações introduzidas nas imagens dependem de padrões definidos chamados elementos estruturantes, que as estudam localmente. No processo de dilatação procura-se verificar quando o elemento estruturante *toca* o objeto e, na erosão, quando ele está *contido* no objeto. Ao serem combinadas, erosões e dilatações dão origem a várias outras transformações para detecção de esqueletos e contornos, descrição de forma, filtragens, preenchimento de buracos, etc.

A teoria desenvolvida por Matheron e Serra foi chamada de *Morfologia Matemática* (MM). O nome apareceu entre 1964 e 1968, no campus de *Fontainebleau*. A palavra *morfologia* vem do grego e significa estudo das formas. Consistente com o significado literal, o propósito original era analisar estruturas geométricas em imagens microscópicas de amostras de rochas ou metais, e relacionar os resultados com propriedades físicas dos materiais. Posteriormente, as idéias estabelecidas inicialmente sobre conjuntos (imagens binárias) foram estendidas para operadores sobre funções (imagens em níveis de

cinza). A ligação entre os conceitos aplicados a subconjuntos e os conceitos aplicados a funções estabeleceu-se pela noção de *sombra* (ou *umbra*) de uma função, isto é, o lugar geométrico dos pontos situados abaixo do gráfico da função. A Figura 9 exhibe uma imagem binária representada pela noção de conjunto e uma imagem em tons de cinza representada por uma função. Na Figura 9(a),  $X$  denota o conjunto da imagem (*bits* com valor 1) e  $X^C$  é seu complemento (*bits* com valor 0). Em (b) a imagem em tons de cinza pode ser representada por uma função cujo domínio é definido pelas coordenadas  $(x, y)$  e o contradomínio é dado pelos valores de  $k = f(x, y)$ .

Mais detalhes sobre o surgimento da MM e as motivações que levaram George Matheron e Jean Serra a desenvolver esta teoria podem ser encontrados em Matheron e Serra (2002).



**Figura 9:** Noção de conjunto e função para representação de imagens digitais.  
 Fonte: Adaptada de SDC (2001) e MATLAB (2008).

Segundo Goutsias e Heijmans (2000), o problema básico da MM é a designação de operadores não-lineares que extraíam informação topológica ou geométrica relevante de imagens. Isto requer o desenvolvimento de um modelo matemático para imagens e uma teoria rigorosa que descreva as propriedades fundamentais dos operadores desejados.

**Lema 1:** Sejam  $f_1, f_2$  e  $f_3$  imagens em tons de cinza. O conjunto de imagens com a relação  $\leq$  é um conjunto parcialmente ordenado e tem as seguintes propriedades:

$$\begin{aligned}
 f_1 &\leq f_1 && \text{(Reflexividade)} \\
 f_1 &\leq f_2, f_2 \leq f_1 \Leftrightarrow f_1 = f_2 && \text{(Anti-simetria)} \\
 f_1 &\leq f_2, f_2 \leq f_3 \Rightarrow f_1 \leq f_3 && \text{(Transitividade)}
 \end{aligned} \tag{29}$$

Além disso, o conjunto é um *reticulado completo*  $\mathcal{L}$  desde que exista, para cada família de imagens, um *supremo* e um *ínfimo*. O supremo de um conjunto é seu menor limite superior, e o ínfimo de um conjunto é seu maior limite inferior.

Como era de se esperar, em processamento de imagens existem casos em que não é possível estabelecer uma relação de ordem parcial. Candeias (1997) cita como exemplos imagens de fase em interferometria e o matiz de uma imagem colorida no espaço HSV.

**Definição 20:** As operações de supremo  $\vee$  e ínfimo  $\wedge$  entre as imagens  $f$  e  $g$  de mesmo domínio são definidas, para cada pixel  $x$ , da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 (f \vee g)(x) &= \text{máx}[f(x), g(x)] \\
 (f \wedge g)(x) &= \text{mín}[f(x), g(x)]
 \end{aligned} \tag{30}$$

**Lema 2:** Seja  $\mathcal{L}$  um reticulado completo com  $f_1, f_2, f_3 \in \mathcal{L}$ . Então é possível escrever

$$\begin{aligned}
 f_1 \vee f_2 &= f_2 \vee f_1; f_1 \wedge f_2 = f_2 \wedge f_1 && \text{(Comutatividade)} \\
 (f_1 \vee f_2) \vee f_3 &= f_1 \vee (f_2 \vee f_3); (f_1 \wedge f_2) \wedge f_3 = f_1 \wedge (f_2 \wedge f_3) && \text{(Associatividade)} \\
 f_1 \vee (f_2 \wedge f_3) &= f_1; f_1 \wedge (f_2 \vee f_3) = f_1 && \text{(Absorção)}
 \end{aligned} \tag{31}$$

Em que  $\vee, \wedge$  são as operações de supremo e ínfimo. Ressalta-se que no caso mais particular de imagens binárias, a ordem é estipulada pela relação de inclusão e as operações  $\vee, \wedge$  podem ser substituídas por  $\cup, \cap$ .

A Figura 10 mostra um exemplo de supremo e ínfimo entre duas funções  $f$  e  $g$ .

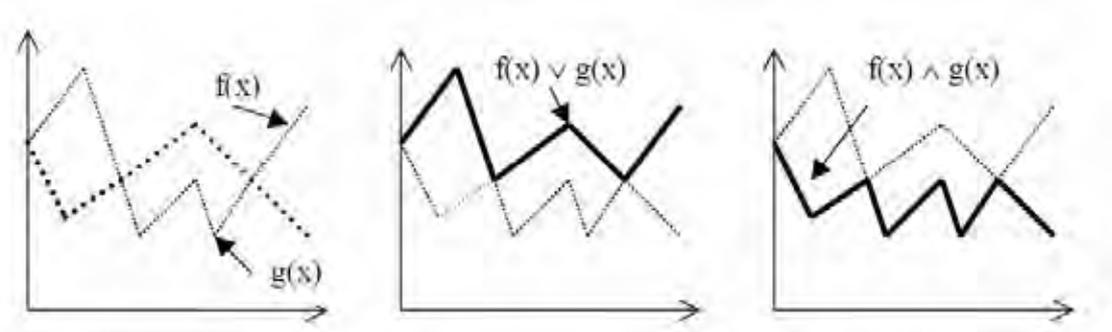


Figura 10: Ínfimo e supremo de duas funções  $f$  e  $g$ .

Fonte: adaptada de MATTA (1998)

**Definição 21:** Uma *transformação morfológica*  $\Psi$  é um mapeamento entre reticulados completos ( $\Psi$  mapeia um elemento do reticulado  $\mathcal{L}_1$  em outro elemento do reticulado  $\mathcal{L}_2$ ). Além disso, uma transformação é morfológicamente aceitável se ela respeita as propriedades de invariância à translação (definição 3), invariância à escala (definição 5), conhecimento local (definição 6) e semi-continuidade (definição 16).

Com base nas definições de supremo e ínfimo (definição 20), chega-se às definições das duas transformações básicas *erosão* e *dilatação*.

**Definição 22** Seja  $B$  um subconjunto de  $\mathbb{Z}^2$ ,  $B \subset E$  (definição 1). A erosão  $\varepsilon$  de uma imagem  $f$ , binária ou em tons de cinza, por  $B$  (denotada por  $\varepsilon_B$ ) é o valor mínimo (ínfimo) entre as translações de  $f$  pelos vetores  $-b$  de  $B$ . Chama-se  $B$  de *Elemento Estruturante* (EE).

$$\varepsilon_B(f) = \bigwedge_{b \in D(B)} f_{-b}. \quad (32)$$

Em outras palavras, o valor da erosão para um dado pixel  $x$  de  $f$  é o valor mínimo da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em  $x$ :

$$[\varepsilon_B(f)](x) = \min_{b \in D(B)} f(x+b). \quad (33)$$

Os efeitos da erosão, ao se considerar uma imagem binária ou em tons de cinza com fundo escuro, são:

- ✓ Escurecer a imagem;
- ✓ Alargar os vales (padrões escuros);
- ✓ Conectar vales próximos;
- ✓ Reduzir e, às vezes, eliminar picos (padrões claros); e
- ✓ Separar picos próximos.

**Definição 23:** A dilatação  $\delta$  de uma imagem  $f$ , binária ou em tons de cinza, por  $B$  (denotada por  $\delta_B$ ) é o valor máximo (supremo) entre as translações de  $f$  pelos vetores  $b$  de  $B$ .

$$\delta_B(f) = \bigvee_{b \in D(B)} f_b. \quad (34)$$

Oposto da erosão, o valor da dilatação para um dado pixel  $x$  é o valor máximo da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em  $x$ :

$$[\delta_B(f)](x) = \underset{b \in D(B)}{\text{máx}} f(x+b). \quad (35)$$

Os efeitos da dilatação, ao se considerar uma imagem binária ou em tons de cinza com fundo escuro, são:

- ✓ Clarear a imagem;
- ✓ Alargar os picos (padrões claros);
- ✓ Conectar picos próximos;
- ✓ Reduzir e, às vezes, eliminar vales (padrões escuros); e
- ✓ Separar vales próximos.

O elemento estruturante apresentado na definição 22 nada mais é que um pequeno conjunto usado para testar a imagem em estudo. Uma vez que o subgrafo de uma imagem  $n$ -dimensional corresponde a um conjunto  $n+1$ -dimensional, elementos estruturantes  $n+1$ -dimensionais podem ser usados para investigar a morfologia de objetos em imagens  $n$ -dimensionais. Elementos estruturantes  $n$ -dimensionais são chamados de elementos

estruturantes *planos*, já que possuem apenas duas dimensões no caso mais comum de imagens bidimensionais. Similarmente, EEs  $n+1$ -dimensionais são chamados *volumétricos* ou *EEs em tons de cinza*. Estes últimos são pequenas imagens em tons de cinza usadas para testar a imagem em análise (SOILLE, 2004). Nas definições 22 e 23 o EE considerado é plano. Caso fosse volumétrico, para cada translação de  $f$  pelos vetores  $-b$  (ou  $b$ ), o ínfimo na erosão (resp. supremo na dilatação) seria tomado após subtrair-se de (resp. adicionar-se a)  $f$  o

contradomínio de  $B$ :  $\bigwedge_{b \in D(B)} f_{-b} - B(b)$  (resp.  $\bigvee_{b \in D(B)} f_b + B(b)$ ).

A forma e o tamanho dos EEs devem ser adaptados às propriedades geométricas dos objetos contidos na imagem a ser processada. Como exemplo, EEs lineares são mais adequados para aplicações em que se objetiva a detecção de objetos lineares da imagem em estudo. A seguir, duas formas básicas de elementos são apresentadas.

$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & \mathbf{1} & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ : Elemento estruturante *cruz*. A posição em negrito marca a origem do EE.

$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{1} & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ : Elemento estruturante *caixa*.

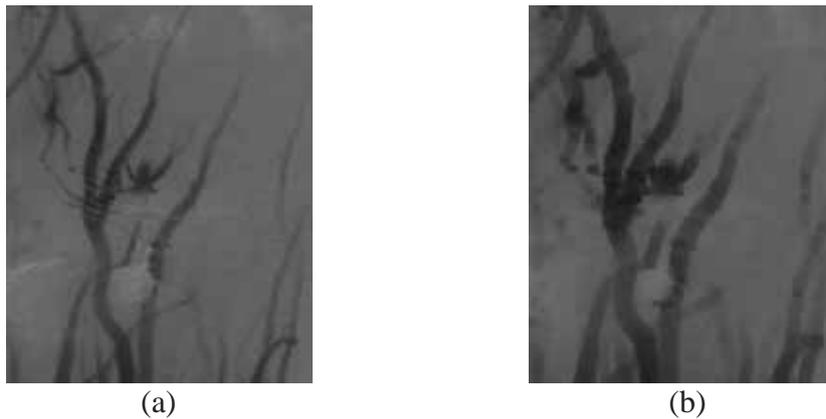
Nos exemplos acima, nenhum elemento possui peso diferenciado, todos tem a mesma importância. São, portanto, EEs planos. Os pesos distintos são considerados apenas para elementos volumétricos. No que diz respeito à origem do EE, é nesta posição que será alocado, na imagem de saída, o valor resultante da transformação. O tamanho de um EE é a medida de seu raio. Note-se que os elementos dados como exemplos possuem raio  $r = 1$ . Elementos maiores podem ser definidos matematicamente ou criados a partir de dilatações do elemento original por ele mesmo. Em termos matemáticos, os EEs *cruz* e *caixa* são modelados pelos seguintes conjuntos de pontos:

$$rB_{cruz} = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^2 : |x| + |y| \leq r\} \quad (36)$$

$$rB_{caixa} = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^2 : \max\{|x|, |y|\} \leq r\}. \quad (37)$$

Em que  $(x, y)$  são pares de coordenadas de um sistema cartesiano com origem  $(x_0 = 0, y_0 = 0)$  no centro do elemento estruturante.

A título de ilustração a Figura 11 mostra os efeitos da erosão sobre uma imagem em tons de cinza. No processo, a imagem (a) é erodida 5 vezes (5 iterações) com um elemento estruturante *caixa*. A imagem erodida é mostrada em (b).



**Figura 11:** Efeitos da erosão sobre uma imagem em tons de cinza: imagem original (a) e erodida (b).

Fonte: NASA/JPL/MSSS.

A Figura 12(a) exibe uma faixa retirada da imagem original (Figura 11(a)) enquanto a Figura 12(b) exibe a mesma faixa sob o efeito de uma erosão com o elemento estruturante *caixa*.

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	
97	101	96	75	60	48	31	34	39
99	100	93	70	58	46	29	33	37
102	102	92	68	58	45	30	34	38

(a)

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	
97	101	96	75	60	48	31	34	39
99	92	68	58	45	29	29	29	37
102	102	92	68	58	45	30	34	38

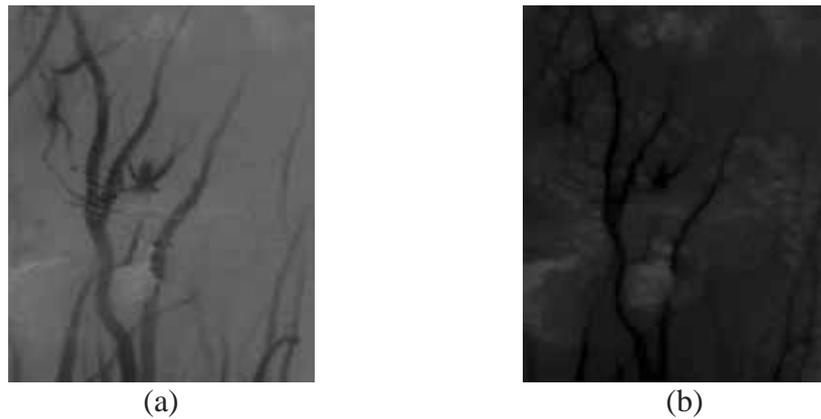
(b)

**Figura 12:** Demonstração numérica do processo de erosão.

A Figura 12(a) mostra uma faixa da imagem original, na qual estão grifadas as posições a serem visitadas pelo pixel central do elemento estruturante e que, portanto, terão

seus valores modificados. Os índices  $x_1, \dots, x_7$  são os identificadores dos pixels submetidos ao processo. A erosão produz, então, o resultado exibido na Figura 12(b) que traz sombreadas as posições cujos valores foram modificados.

A Figura 13 mostra os efeitos da dilatação sobre a mesma imagem utilizada anteriormente. No processo, a imagem (a) é dilatada 5 vezes (5 iterações) com o elemento estruturante *caixa* e o resultado é mostrado em (b).



**Figura 13:** Dilatação em tons de cinza: imagem original (a) e dilatada (b).  
Fonte: NASA/JPL/MSSS.

Mais uma vez, o que ocorre numericamente é ilustrado nas Figuras 14(a) e 14(b). A Figura 14(a) exibe a mesma faixa retirada da imagem original mostrada na Figura 12(a), porém, a Figura 14(b) apresenta o resultado de uma dilatação. Novamente adotou-se o elemento estruturante *caixa*.

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	
97	101	96	75	60	48	31	34	39
99	100	93	70	58	46	29	33	37
102	102	92	68	58	45	30	34	38

(a)

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	
97	101	96	75	60	48	31	34	39
99	102	102	96	75	60	48	39	37
102	102	92	68	58	45	30	34	38

(b)

**Figura 14:** Demonstração numérica do processo de dilatação.

Na Figura 14, o EE foi transladado ao longo da faixa e a cada translação o maior tom de cinza encontrado na vizinhança do pixel origem (incluindo ele próprio e considerando-se a conectividade definida pelo EE) substituiu o valor original da imagem naquele ponto central. O mesmo foi feito na Figura 12, porém, considerando-se o mínimo entre a vizinhança do pixel central.

As propriedades da erosão e dilatação, de acordo com Soille (2004), são:

*Dualidade:* Erosão e dilatação são transformações duais com respeito a seus complementos. A propriedade de dualidade ilustra o fato de que erosões e dilatações não processam os objetos e o fundo das imagens simetricamente. De fato, estes operadores não são auto-duais, ao contrário de transformações lineares como convoluções. Além disso, não existe transformação inversa para erosões e dilatações e estas não preservam a homotopia das imagens.

*Isotonia:* Erosões e dilatações são invariantes a translações e preservam a relação de ordem das imagens, portanto são operadores crescentes:

$$f \leq g \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon(f) \leq \varepsilon(g) \\ \delta(f) \leq \delta(g) \end{cases}. \quad (38)$$

*Distributividade:* Erosão e dilatação são distributivas com respeito aos operadores de máximo e mínimo locais:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\bigwedge_i f_i) &= \bigwedge_i \varepsilon(f_i) \\ \delta(\bigvee_i f_i) &= \bigvee_i \delta(f_i). \end{aligned} \quad (39)$$

*Decomposição:* Erosões e dilatações podem ser decompostas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \delta_{B_2} \delta_{B_1} &= \delta_{(\delta_{B_2}(B_1))} \\ \varepsilon_{B_2} \varepsilon_{B_1} &= \varepsilon_{(\varepsilon_{B_2}(B_1))}. \end{aligned} \quad (40)$$

Em que  $\check{B}$  é o elemento estruturante transposto (ou refletido, simétrico em relação à origem):

$$\check{B} = \{-b \mid b \in B\}.$$

Esta propriedade é de especial interesse prático já que permite a decomposição de EEs maiores em sequências de operações com EEs menores. Por exemplo:

$$\begin{aligned}\delta_{nB} &= \delta_B^n \\ \varepsilon_{nB} &= \varepsilon_B^n.\end{aligned}\tag{41}$$

De acordo com a equação 41, erodir/dilatar uma imagem com EE de tamanho (ou raio)  $n$  é equivalente a erodir/dilatar a imagem  $n$  vezes com o EE de tamanho (ou raio) 1.

*Ordenação:* A Erosão com um determinado EE é menor ou igual à dilatação com o mesmo EE. Entretanto, a dilatação não é uma transformação extensiva bem como a erosão não é anti-extensiva. Estas duas afirmações são facilmente percebidas quando são utilizados EEs que não contêm suas origens. Porém, se o EE contém sua origem, existe o seguinte relacionamento:

$$\varepsilon_B \leq I \leq \delta_B.\tag{42}$$

*Conhecimento local:* Quando o EE se ajusta totalmente ao domínio da imagem o resultado do operador é conhecido sem sombra de dúvida e não há efeitos de borda. De fato, o subconjunto do domínio onde as bordas não causam influência é o domínio erodido pelo EE em questão:

$$\begin{aligned}\varepsilon_B(f | D(f)) | \varepsilon_B(D(f)) &= \varepsilon_B(f) | \varepsilon_B(D(f)) \\ \delta_B(f | D(f)) | \varepsilon_B(D(f)) &= \delta_B(f) | \varepsilon_B(D(f)).\end{aligned}\tag{43}$$

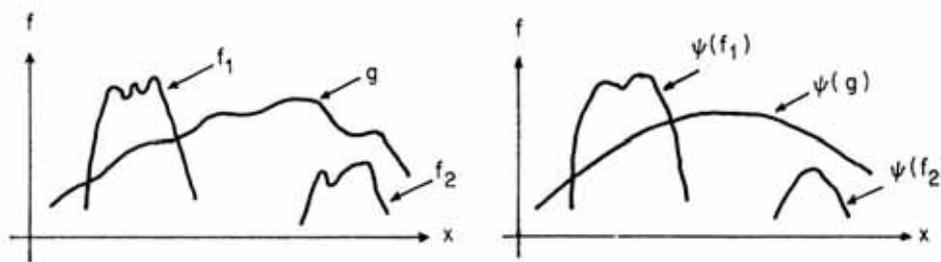
Com base na equação 43 pode-se concluir que ao se fazer medidas sobre a imagem o ideal é considerar apenas o domínio erodido. Os efeitos de borda podem ser contornados ao se considerar a existência de valores específicos além do domínio. Como exemplo,  $k_{máx}$  (máximo tom de cinza) pode ser considerado para erosões e 0 (zero) para dilatações. Isso evita o encolhimento do domínio da imagem após as transformações morfológicas.

Mais detalhes sobre as propriedades e exemplos de aplicação de erosão e dilatação podem ser encontrados em Serra (1986), Barrera (1987), Haralick, Sternberg e Zhuang (1987), Facon (1996), Banon e Barrera (1998) e Shih (2009).

A partir das transformações de erosão e dilatação, que são a base da MM, é possível derivar-se filtros morfológicos. Uma definição de filtro morfológico, segundo Serra (1992) é:

**Definição 24:** Seja  $\mathcal{L}$  um reticulado completo. Um filtro morfológico em  $\mathcal{L}$  é toda transformação  $\Psi: \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}$  que é *crescente* (definição 10) e *idempotente* (definição 7).

Dois efeitos práticos de bastante importância para os filtros morfológicos são: eles preservam as relações de contraste, devido à propriedade de crescimento; e a perda de informação causada pela filtragem é controlada, graças à propriedade de idempotência. A Figura 15 ilustra a preservação de contraste relativo:



**Figura 15:** Preservação de contraste após filtragem morfológica.

Fonte: SERRA (1988).

Na Figura 15 os sinais  $f_1$ ,  $f_2$  e  $g$  mantêm suas posições relativas após as filtrações  $\Psi$ . É fácil concluir pela definição 10 que filtros morfológicos não são lineares. A propriedade de crescimento implica perda de informação do sinal que não pode ser recuperada, por exemplo, por um processo de *deconvolução*, como ocorre com filtros lineares.

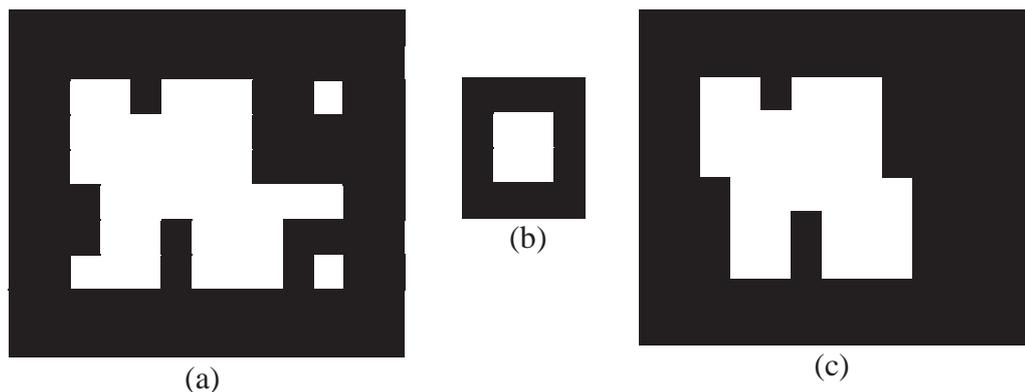
Conforme escreve Soille (1999), a erosão de uma imagem não apenas remove todas as estruturas que não contém o elemento estruturante, mas também reduz todas as outras. A busca por um operador que recupere a maioria das estruturas perdidas pela erosão leva à definição do filtro de abertura morfológica. O princípio consiste em dilatar a imagem previamente erodida com o mesmo elemento estruturante, porém transposto. Obviamente, aquelas estruturas completamente destruídas pela erosão não podem ser recuperadas. Este comportamento é uma das propriedades fundamentais da transformação: as estruturas da imagem são seletivamente filtradas, sendo que a seleção depende da forma e tamanho do elemento estruturante. O operador dual da abertura morfológica é o fechamento morfológico.

**Definição 25:** Todo filtro anti-extensivo (definição 9)  $\Psi: \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}$  é uma abertura, e todo filtro extensivo (definição 8) é um fechamento.

**Definição 26:** A abertura  $\gamma$  de uma imagem  $f$  por um EE  $B$  é denotada por  $\gamma_B(f)$  e é definida como a erosão de  $f$  por  $B$ , seguida de sua dilatação:

$$\gamma_B(f) = \delta_B[\varepsilon_B(f)]. \quad (44)$$

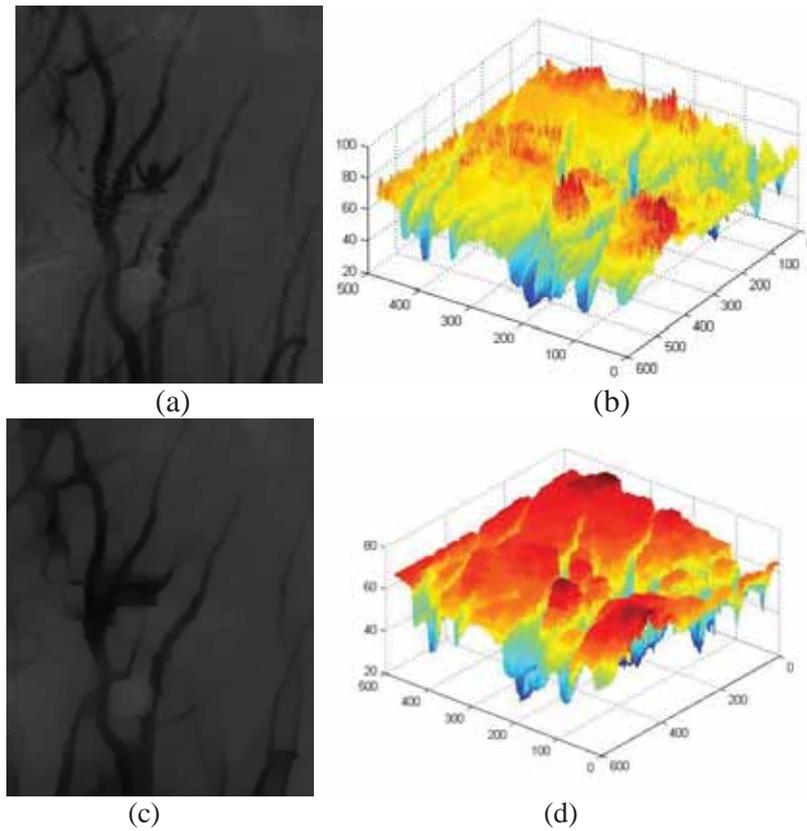
A Figura 16(c) simula a abertura do conjunto  $X$ , mostrado em (a), pelo elemento estruturante em (b). Na Figura 16(a) os subconjuntos de  $X$  que não contém o elemento estruturante são eliminados pela filtragem.



**Figura 16:** Abertura  $\gamma$  de um conjunto  $X$  por um EE  $B$ .

Fonte: Adaptada de SOILLE (1999).

Um exemplo de abertura sobre funções é dado na Figura 17. A imagem original na Figura 17(a) foi aberta por um EE do tipo *caixa*, com diâmetro igual a 10 pixels. A Figura 17(b) mostra a imagem original como uma função  $k = f(x, y)$ . Após a filtragem, o que sobra é uma imagem com os tons mais claros suavizados, mostrada em (c) e em (d).



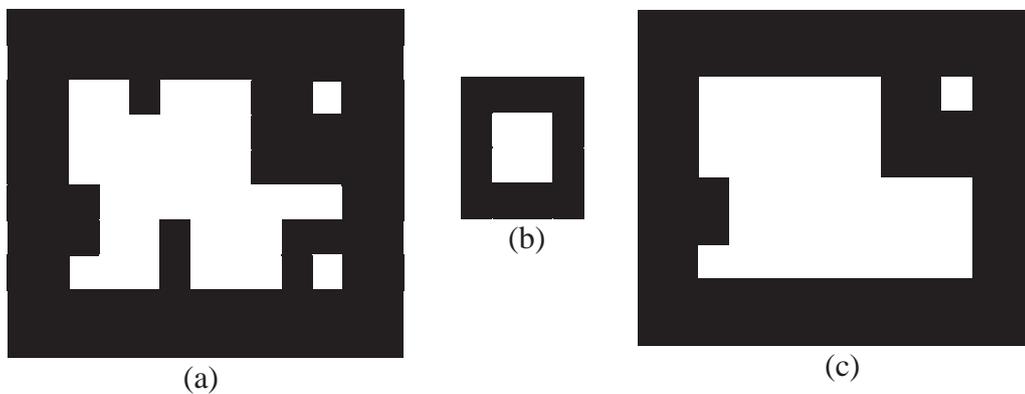
**Figura 17:** Ilustração do filtro de abertura sobre funções.

Fonte: NASA/JPL/MSSS.

**Definição 27:** O fechamento de uma imagem  $f$  por um EE  $B$  é denotado  $\phi_B(f)$  e é definido como a dilatação de  $f$  pelo EE seguida por sua erosão:

$$\phi_B(f) = \varepsilon_B [\delta_B(f)]. \quad (45)$$

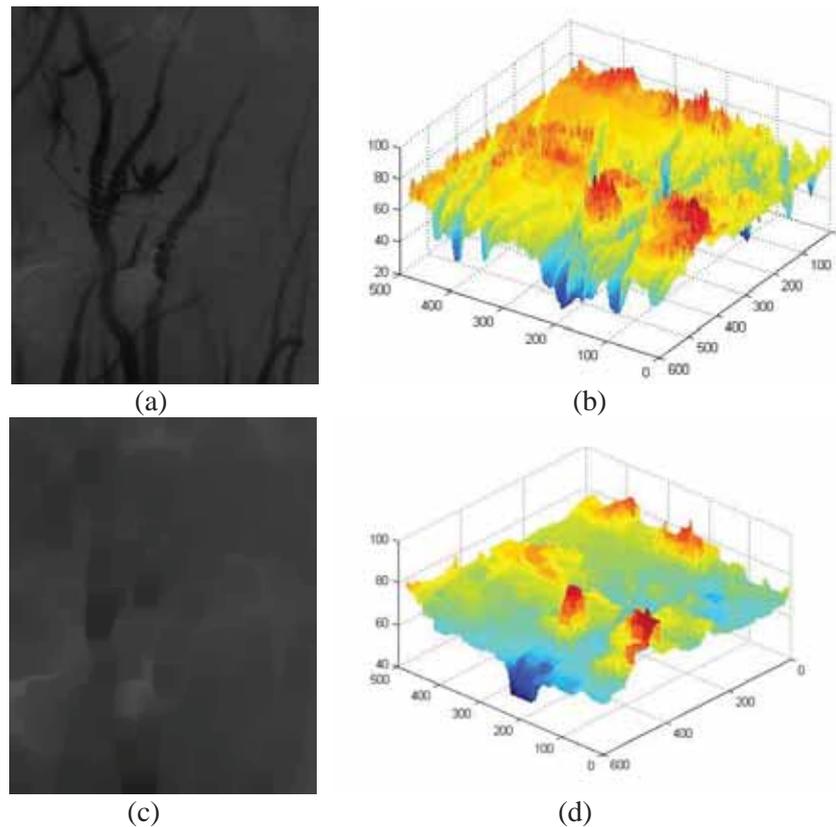
A Figura 18(c) simula o fechamento do conjunto  $X$ , mostrado em (a), pelo elemento estruturante em (b).



**Figura 18:** Fechamento  $\phi$  de um conjunto  $X$  por um EE  $B$ .

Fonte: Adaptada de SOILLE (1999).

Na Figura 18, observa-se que o fechamento filtra todas as estruturas do complemento de  $X$  que não contém o EE. Os subconjuntos de  $X^C$  filtrados são agregados ao conjunto  $X$ . A seguir, é dado um exemplo de fechamento sobre imagens em tons de cinza na Figura 19. Para a filtragem da imagem em (a) foi usado um EE do tipo *caixa* com diâmetro igual a 10 pixels. Feições perdidas no processo de dilatação não puderam ser recuperadas pela subsequente erosão. Os resultados em (c) e (d) mostram a função de iluminação da cena.



**Figura 19:** Ilustração do filtro de fechamento sobre funções.

Diante dos exemplos, especialmente os dados nas Figuras 17 e 19, percebe-se que, ao se considerar uma imagem com pixels relevantes claros e pixels de fundo escuros, a abertura suprime estruturas relevantes que não contém o EE enquanto o fechamento suprime estruturas pertencentes ao fundo da imagem que também não contém o EE.

Segundo Vincent (1992; 1993) e Soille (1999), uma transformação tendo as mesmas propriedades da abertura, mas que não pode ser escrita como uma única erosão seguida pela dilatação com o elemento estruturante transposto é chamada *abertura algébrica*. Sua operação dual é o *fechamento algébrico*. Matheron (1975) mostrou que qualquer abertura algébrica pode ser definida como o supremo de uma família de aberturas. Uma poderosa

ferramenta para filtragem de componentes conectados é uma abertura algébrica chamada *abertura por área*.

**Definição 28:** Segundo Soille (1999), a abertura por área  $\gamma_\lambda$  é equivalente à união (ou supremo) de todas as aberturas com os EEs conectados  $B$  cujas áreas, dadas em número de pixels, sejam iguais a  $\lambda$ :

$$\gamma_\lambda(f) = \bigvee_i \{\gamma_{B_i}(f)\}. \quad (46)$$

Em que  $B_i$  é conectado e sua área é igual a  $\lambda$ .

Note-se que um conjunto é *conectado* se cada par de seus pontos pode ser unido por um caminho cujos pontos pertencem ao conjunto.

**Definição 29:** Segundo Soille (1999), o fechamento por área  $\phi_\lambda$  é equivalente à interseção (ínfimo) de todos os fechamentos com o EE conectado  $B$  cuja área, dada em número de pixels, é igual a  $\lambda$ :

$$\phi_\lambda(f) = \bigwedge_i \{\phi_{B_i}(f)\}. \quad (47)$$

Em que  $B_i$  é conectado e sua área é igual a  $\lambda$ .

Aberturas e fechamentos por área funcionam como filtros adaptativos, já que o EE se adapta à geometria das estruturas que estão sendo filtradas pelo critério de área. A Figura 20 mostra uma imagem binária (a) filtrada por uma abertura (b) e por um fechamento (c) com critério  $\lambda = 500$  pixels.

As definições 28 e 29 também se estendem a imagens em tons de cinza. Neste caso, o processo não é tão intuitivo e pode ser mais bem entendido através dos conceitos de *seção transversal* e *decomposição em limiares* da imagem.

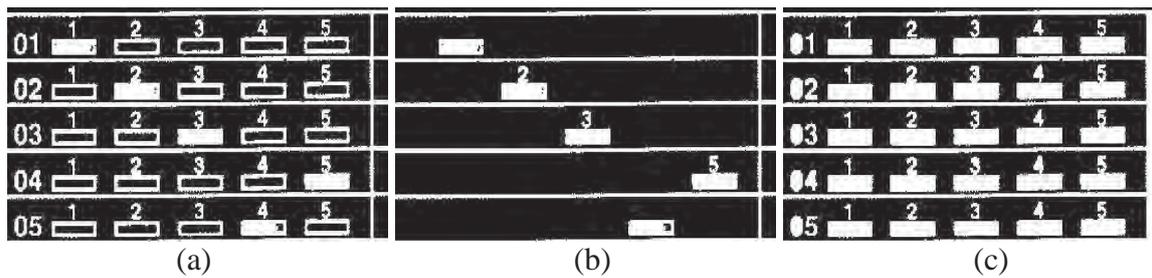


Figura 20: Abertura e fechamento de área de tamanho igual a quinhentos pixels.  
 Fonte: SDC (2001).

**Definição 30:** A seção transversal  $CS_t(f)$  de uma imagem em tons de cinza  $f$  ao nível  $t$  (ver definição 18) é o conjunto de pixels da imagem cujos valores são maiores ou iguais a  $t$  (SOILLE, 1999).

**Definição 31:** Se  $f$  é uma imagem em tons de cinza, ela pode ser decomposta como a soma de suas seções transversais (ou limiares), com exceção do nível 0 (que sempre será constante e igual a 1).

$$f = \sum_{t=1}^{k_{\max}} CS_t(f). \quad (48)$$

A Figura 21 simula uma *linha* de uma imagem  $f$  em tons de cinza decomposta em seções transversais. A variável  $x$  dá a posição dos pixels na linha e  $f(x)$  representa os valores de cinza para cada posição (note-se que aqui  $x, f(x) \in \mathbb{Z}$ ).

$f(x)$	0	0	1	3	2	2	4	4	0	5	5	3	0
$CS_6(f)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$CS_5(f)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
$CS_4(f)$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
$CS_3(f)$	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0
$CS_2(f)$	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
$CS_1(f)$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
$CS_0(f)$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$x$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Figura 21: Uma linha da imagem  $f$  decomposta em suas seções transversais.  
 Fonte: Adaptada de SOILLE (1999).

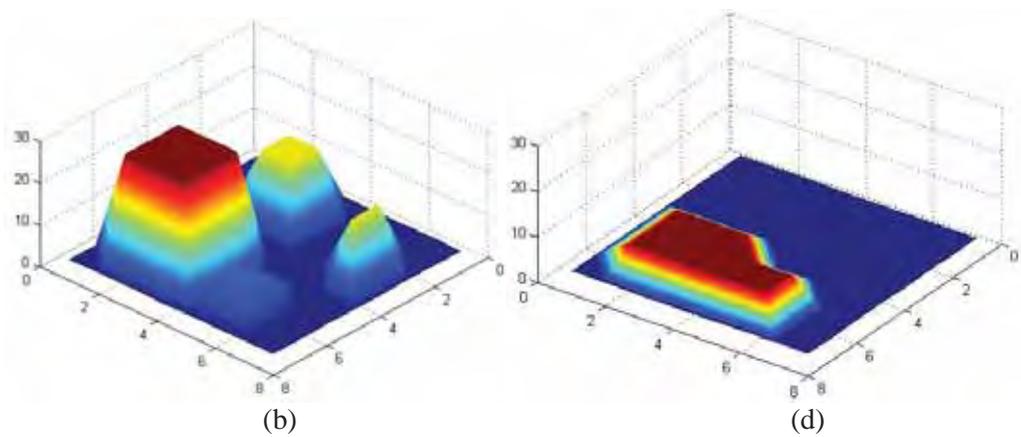
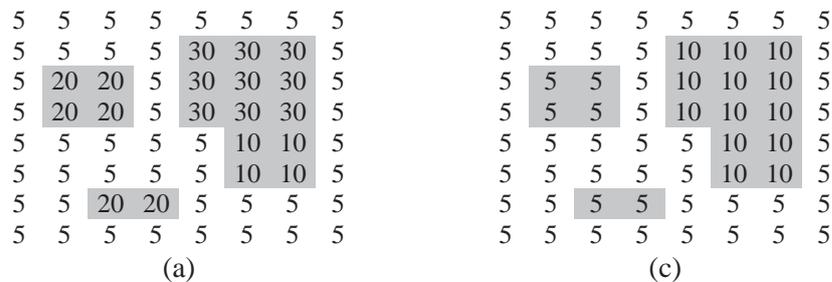
Aberturas e fechamentos por área ao serem aplicados a uma imagem em tons de cinza fazem valer o critério de área sobre cada uma das seções transversais da imagem. Isso é possível porque as transformações de abertura e fechamento de área são invariantes à decomposição em limiares.

**Definição 32:** Uma transformação  $\Psi$  é invariante à decomposição em limiares se ela pode ser escrita como a soma das transformações de suas seções transversais:

$$\Psi \text{ é invariante à decomposição em limiares } \Leftrightarrow \Psi = \sum_{t=1}^{k_{\max}} \Psi CS_t . \quad (49)$$

Portanto, se um operador é primeiro definido para imagens binárias e possui a propriedade dada na definição 32, ele é diretamente estendido a imagens em tons de cinza como a soma das transformações em suas seções transversais.

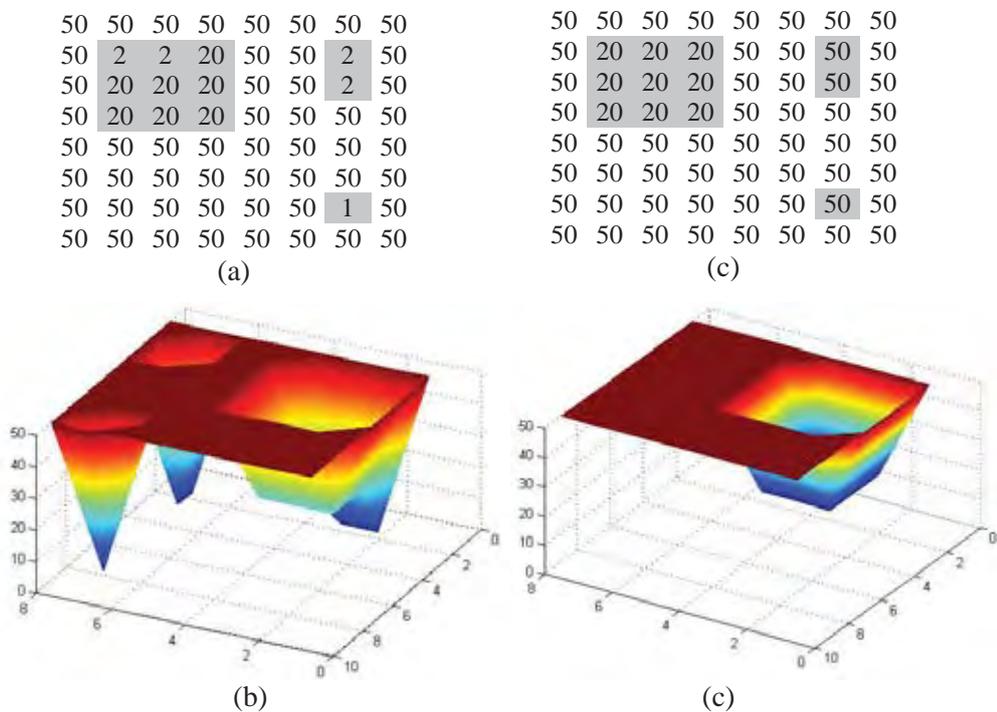
A Figura 22 simula a aplicação de abertura por área sobre a imagem em tons de cinza em (a), representada como uma função em (b). O critério de área adotado foi  $\lambda = 10$  e o resultado é mostrado em (c) e (d).



**Figura 22:** Simulação de abertura por área em imagem em tons de cinza.

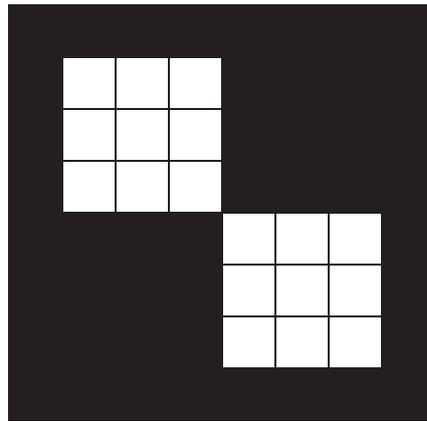
Na Figura 22(a) os pixels relevantes, com intensidades maiores que 5, estão sombreados. Em (c), a abertura de área eliminou os componentes conectados com áreas 4 e 2 (com intensidades iguais a 20) e reduziu o componente de área igual a 9, com intensidade 30, até este formar um planalto com a estrutura vizinha, de área 4 e intensidade 10.

Um fechamento por área é simulado na Figura 23. A imagem original é exibida em (a). A transformação atua agora no complemento da imagem, representado pelos pixels com valores de intensidade menores que 50. O critério de área adotado foi  $\lambda = 3$ . Os componentes conectados do fundo da imagem foram eliminados ou reduzidos, como se observa nas Figuras 23(c) e 23(d).



**Figura 23:** Simulação de fechamento de área em imagem em tons de cinza.

Nos exemplos mostrados nas Figuras 22 e 23 a conectividade foi dada pelo EE *cruz*. Cabe aqui um olhar mais atento aos efeitos da conectividade sobre as aberturas e fechamentos algébricos. Considere a Figura 24 em que é simulada uma imagem binária, com pixels relevantes em branco e pixels de fundo em preto.



**Figura 24:** Simulação de imagem binária.

Se a conectividade for estipulada pelo EE *cruz*, a vizinhança considerada será de quatro pixels. Uma abertura com este EE e com  $\lambda = 10$  aplicada na imagem mostrada na Figura 24 implicará a eliminação de todos os pixels relevantes, já que, de acordo com a conectividade, a imagem possui dois componentes com áreas iguais a 9 pixels. O EE *caixa* considerará uma vizinhança de oito pixels e a transformação não fará efeito, uma vez que neste caso, de acordo com a conectividade, a imagem possui uma única estrutura com área igual a 18 pixels. Outras informações e aplicações de aberturas e fechamentos algébricos podem ser encontradas em Vincent (1992; 1993), Breen e Jones (1996), Statella (2005) e Statella e Silva (2008).

Ao disponibilizar transformações que permitem o estudo do tamanho, geometria e orientação dos objetos contidos em imagens, a MM também possibilita a análise da textura de tais objetos. Esta análise baseia-se na *granulometria* dos alvos imageados, conceito introduzido por Matheron (1967) como uma nova ferramenta para estudar meios porosos. Para caracterizar o tamanho dos poros em um meio contínuo, o referido autor utilizou uma série de aberturas com uma família de EEs de tamanho crescente (VINCENT, 2000; SOILLE, 2004). De acordo com Vincent (2000), o estudo destas operações levou Matheron a escrever o seguinte:

**Definição 33:** Seja  $\Psi = (\psi_\lambda)_{\lambda \geq 0}$  uma família de transformações dependentes do parâmetro  $\lambda \in \mathbb{Z}$ . Esta família constitui uma granulometria se, e somente se, as transformações são crescentes (definição 10), anti-extensivas (definição 9) e idempotentes (definição 7).

**Definição 34:** Uma família  $\Psi = (\psi_\lambda)_{\lambda \geq 0}$  de transformações dependentes do parâmetro  $\lambda$  é uma granulometria se ela constitui uma família de aberturas decrescentes, isto é:

$$\begin{aligned} \forall \lambda \geq 0, \quad \psi_\lambda \text{ é uma abertura,} \\ \forall \lambda \geq 0, \mu \geq 0, \quad \lambda \geq \mu \Rightarrow \psi_\lambda \leq \psi_\mu. \end{aligned} \quad (50)$$

A definição 34 também se estende a aberturas algébricas, ou seja, não precisam, necessariamente, ser baseadas em EEs (SERRA, 1983; VINCENT, 2000). Vincent (2000) cita como exemplo de granulometria algébrica a *granulometria por área*. Do ponto de vista morfológico, Matheron (1975) caracteriza a granulometria da seguinte maneira:

**Lema 3:** Seja  $B \in \mathbb{Z}^2$  um elemento estruturante. A família  $\Gamma = (\gamma_\lambda)_{\lambda \geq 0}$  de aberturas pelas escalas  $\lambda B = \{\lambda b \mid b \in B\}$ ,  $\lambda \geq 0$ , é uma granulometria se, e somente se,  $B$  é convexo.

Por definição, cada abertura da sequência é menor que sua predecessora. No caso binário isso significa que:

$$\forall X \subset \mathbb{Z}^2, \quad \forall \lambda \geq \mu \geq 0, \quad \gamma_\lambda(X) \subseteq \gamma_\mu(X). \quad (51)$$

Em que  $\mu \in \mathbb{Z}$ .

A análise granulométrica de um conjunto  $X$  (ou imagem binária) com respeito a uma família de aberturas granulométricas pode ser comparada ao processo de *peneiramento*:  $X$  é peneirado com uma série de redes cujos orifícios (dados pela dimensão do EE) aumentam de tamanho. Cada abertura remove acumuladamente mais ou o mesmo que sua predecessora até que todos os componentes da imagem são filtrados. Com esse conceito em mente é possível compreender melhor os efeitos das propriedades citadas na definição 38: como as transformações são anti-extensivas o que resta na peneira após uma filtragem é uma amostra do conjunto original; a propriedade de crescimento faz com que, ao se filtrar uma amostra do conjunto inicial, o que resta na peneira é também uma amostra do que restaria se todo o conjunto tivesse sido filtrado; e peneirar uma amostra duas vezes com a mesma rede equivale a peneirá-la uma única vez, graças à propriedade de idempotência.

A taxa com a qual  $X$  é peneirado serve como parâmetro para caracterização do conjunto. Para quantificar essa taxa é necessário utilizar uma medida sobre conjuntos, como por exemplo, a área de um conjunto em número de pixels ou a quantidade de componentes conexos a ele pertencentes. Estabelecida uma medida  $m(X)$ , é possível desenhar um gráfico do tamanho da abertura, dado pela cardinalidade ou pelo raio do EE, *versus*  $m(X)$ , conhecido como *espectro padrão*:

**Definição 35:** O espectro padrão de um conjunto  $X$  com respeito à granulometria  $\Gamma = (\gamma_\lambda)_{\lambda \geq 0}$  é o mapeamento  $EP_\Gamma(X)$  dado por:

$$EP_\Gamma(X)(\lambda) = m(\gamma_\lambda(X) - \gamma_{\lambda+1}(X)). \quad (52)$$

Note-se pela equação 52 que, no caso em que  $m(X)$  é uma medida da área (em número de pixels) de  $X$ , o espectro padrão representa a perda de área entre duas aberturas sucessivas *versus* o tamanho da abertura. Além disso, o pico do gráfico indica o tamanho prevaemente das estruturas do conjunto. Por dualidade, a definição 35 também se aplica a granulometrias por fechamentos (VINCENT, 2000; SOILLE, 2004).

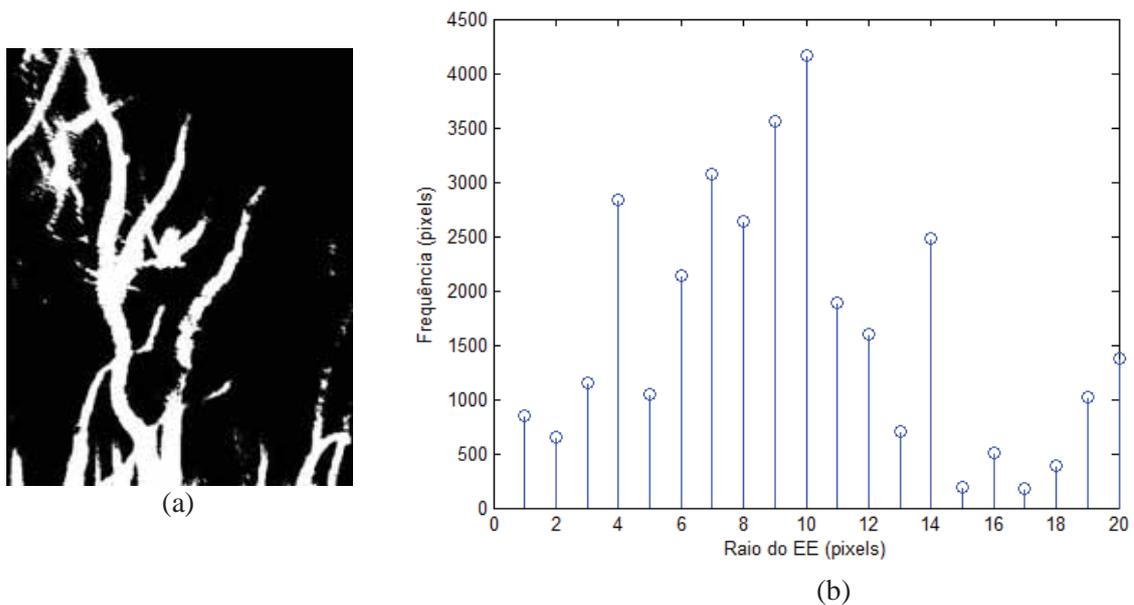
Em princípio, qualquer EE convexo pode ser empregado em granulometrias. Na prática, a escolha é feita com base na geometria dos objetos em estudo. Para análise textural de objetos circulares, ou aproximadamente circulares, é comum o emprego do EE *disco*:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \mathbf{1} & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante } disco \text{ com raio } r = 2.$$

Em termos matemáticos, o EE *disco* pode ser modelado pela seguinte conjunto de pontos:

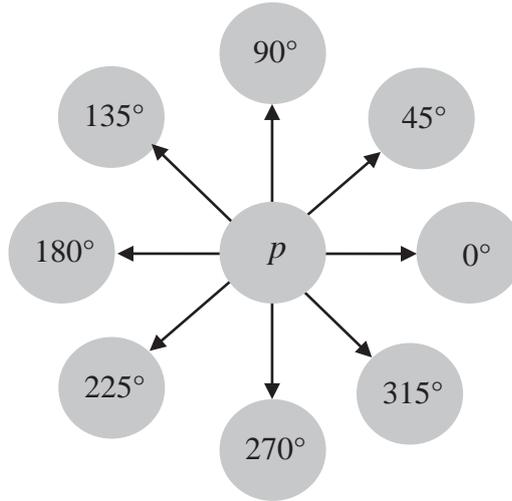
$$rB_{disco} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{Z}^2 : \sqrt{x^2 + y^2} \leq r \right\}. \quad (53)$$

A Figura 25 mostra um exemplo de granulometria por abertura feita com o EE *disco*. Em (a) é apresentada a imagem original, em (b) seu espectro padrão (cujas abscissas são os raios dos EEs e cujas ordenadas são as frequências dos pixels removidos da imagem) Da análise do espectro padrão percebe-se que a largura prevalente dos objetos em (a) corresponde a um EE *disco* com raio igual a 10 pixels, uma vez que a este raio foi atribuída a maior frequência de pixels removidos. Também se percebe que os objetos mais largos da imagem original possuíam o tamanho de um disco com raio igual a 20 pixels.



**Figura 25:** Exemplo de granulometria por abertura.

Além da distribuição de tamanho de partículas, a granulometria também pode ser usada para inferir a direção de objetos da imagem. Para tanto, uma família de EEs lineares  $(L_\lambda)_{\lambda \geq 0}$  com orientações específicas é empregada. Para um dado pixel  $p$ , as direções de seus vizinhos (considerando a conectividade estabelecida pelo EE *caixa*)  $N_d(p)$ , em que  $d = 0^\circ, 45^\circ, \dots, 315^\circ$ , são definidas conforme a Figura 26:



**Figura 26:** Direções dos 8 vizinhos do pixel  $p$ .

A direção oposta à  $d$  é denotada  $\bar{d}$ . Como exemplo, se  $d = 0^\circ$ , então  $\bar{d} = 180^\circ$ . Para uma direção  $d$  e um parâmetro  $\ell \geq 0$ ,  $N_d^\ell(p)$  é o  $\ell$ -ésimo vizinho de  $p$  na direção  $d$ . Então o *raio* com origem em  $p$  e o *caminho* passante por  $p$ , na direção  $d$ , são definidos como segue:

**Definição 36:** O raio na direção  $d$  com origem no pixel  $p$  em um conjunto  $X$  é dado por:

$$r_{X,d}(p) = \{N_d^\ell(p) \mid \ell \geq 0 \text{ e } \forall 0 \leq j \leq \ell, N_d^j(p) \in X\}. \quad (54)$$

**Definição 37:** O caminho na direção  $d$  passante pelo pixel  $p$  de  $X$  é dado por:

$$C_{X,d}(p) = r_{X,d}(p) \cup r_{X,\bar{d}}(p). \quad (55)$$

Pela definição 43, a união dos raios nas direções  $d$  e  $\bar{d}$  forma o caminho na direção  $d$ . Como exemplo, o caminho na direção  $45^\circ$  é formado pelos raios com origem em  $p$  orientados a  $45^\circ$  e  $225^\circ$  (note-se que o caminho na direção  $225^\circ$  é idêntico ao caminho na direção  $45^\circ$ , uma vez que são formados pelos mesmos raios). Ainda com base nesta definição é possível estabelecer uma família de EEs lineares cujos caminhos são orientados nas direções  $0^\circ$  (ou E-W),  $45^\circ$  (ou NE-SW),  $90^\circ$  (ou N-S) e  $135^\circ$  (ou NW-SE):

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & \mathbf{1} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante } \textit{linha} \text{ com orientação } 0^\circ \text{ (ou E-W).}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante } \textit{linha} \text{ com orientação } 45^\circ \text{ (ou NE-SW).}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante } \textit{linha} \text{ com orientação } 90^\circ \text{ (ou N-S).}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante } \textit{linha} \text{ com orientação } 135^\circ \text{ (ou NW-SE).}$$

Matematicamente, um elemento estruturante linear com raio  $r$  e orientação  $\theta$  pode ser modelado pelo conjunto de pontos:

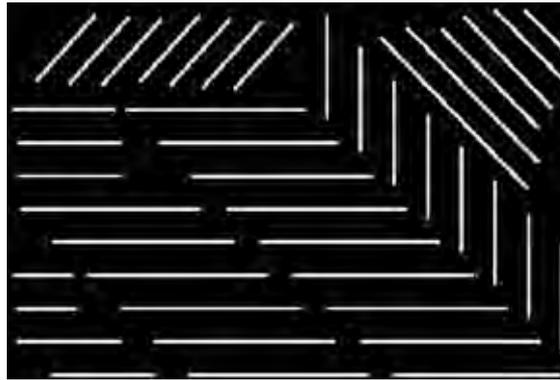
$$rB_{\textit{linha}}^\theta = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^2 : x \in [0, r \cos \theta], y = x \tan \theta\} \quad (56)$$

O número de pixels em cada caminho é chamado *comprimento* do caminho e é denotado por  $l(C)$ , assim:

**Definição 38:** A abertura de  $X$  por  $L_\lambda$  é a união dos caminhos  $C_{x,d}(p)$  em uma determinada direção cujo comprimento é estritamente maior que  $\lambda$ :

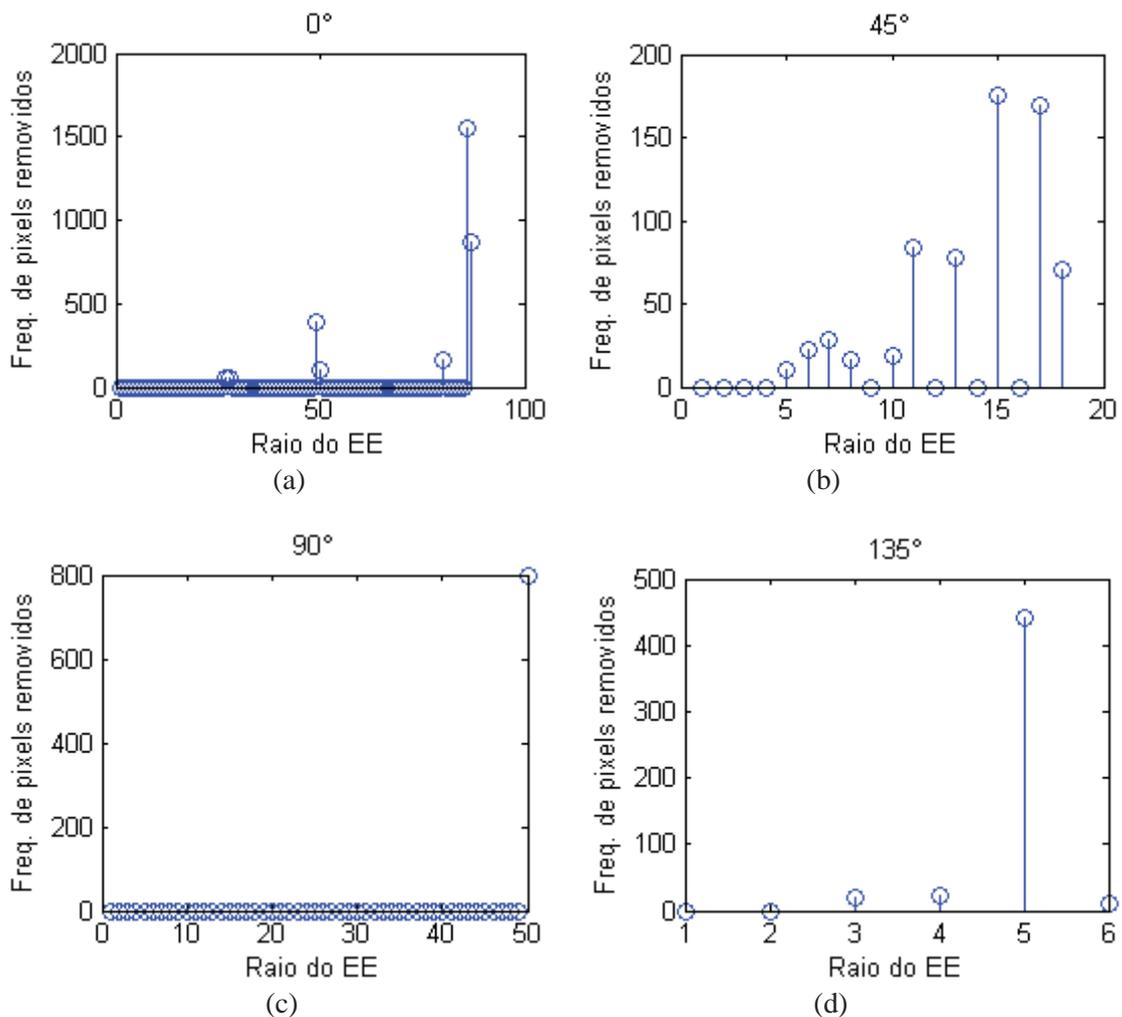
$$\gamma_{L_\lambda}(X) = \bigcup_{p \in X} \{C_{x,d}(p) \mid l(C_{x,d}(p)) > \lambda\}. \quad (57)$$

Um exemplo de granulometria para determinação da direção principal de objetos em imagens é dado a seguir. A Figura 27 é a imagem de entrada com feições lineares nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ .



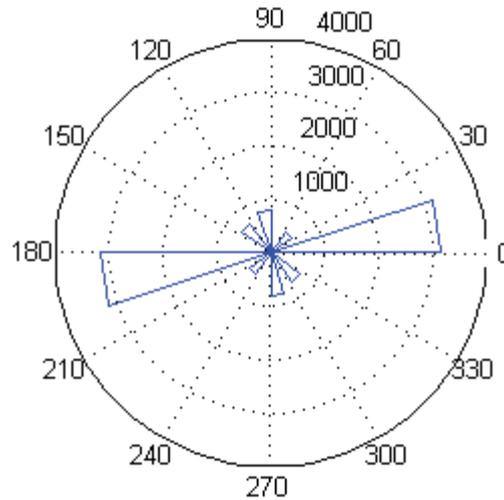
**Figura 27:** Imagem binária com feições lineares.

A Figura 28 apresenta os espectros da imagem de entrada gerados a partir de EEs com caminhos orientados a  $0^\circ$  (a),  $45^\circ$  (b),  $90^\circ$  (c) e  $135^\circ$  (d). As maiores frequências em cada uma destas quatro direções foram, respectivamente: 1.545, 175, 797 e 441 pixels. Portanto, a direção principal das feições contidas na imagem original é  $0^\circ$ .



**Figura 28:** Espectros padrão com EEs nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ .

Uma representação mais compacta para as granulometrias direcionais é a *rosa* (ou *diagrama*) *de direções*, mostrada na Figura 29. Nela, cada círculo concêntrico representa a quantidade de pixels filtrados em cada abertura (essa quantidade é representada pelas fatias do gráfico).



**Figura 29:** Rosa de direções para a imagem mostrada na Figura 28.

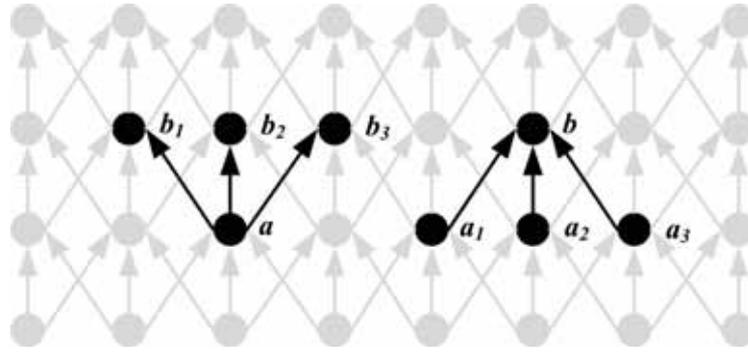
Outros exemplos de aplicação de granulometrias são encontrados em Valero et al. (2010), Soille (1999; 2004), Schmitt (1991) e Zhang, Murai e Baltasvias (1999).

Aberturas e fechamentos também podem considerar EEs lineares que não sejam *estritamente* retos, como os apresentados na definição 43. Uma alternativa seria utilizar aberturas e fechamentos por *caminho*. Os caminhos considerados agora não são mais como os definidos anteriormente. Para que não haja confusão, os caminhos a serem considerados nas *aberturas e fechamentos por caminho* serão denotados por  $\delta\text{-path}$ .

**Definição 39:** Seja  $E$  o domínio de uma imagem binária ou em tons de cinza, dotado de uma relação de adjacência  $x \rightarrow y$  (isto é, há uma borda ligando  $x$  a  $y$ ). Então  $x$  é um predecessor de  $y$  e  $y$  é um sucessor de  $x$ . Em geral, a relação  $\rightarrow$  não é simétrica, o que significa que o grafo formado pelos vértices de  $E$  e pela relação de adjacência é um grafo direcionado. Usando a relação de adjacência é possível definir uma dilatação ao escrever (HEIJMANS, BUCKLEY e TALBOT, 2004; HEIJMANS e TALBOT, 2005):

$$\delta(\{x\}) = \{y \in E \mid x \rightarrow y\}. \quad (58)$$

Em outras palavras, a dilatação de um subconjunto  $X \subseteq E$  inclui todos os pontos que possuem um predecessor em  $X$ . Na Figura 30  $(b_1, b_2, b_3)$  são sucessores de  $a$  e  $\delta(\{a\}) = \{b_1, b_2, b_3\}$ . Além disso,  $(a_1, a_2, a_3)$  são os predecessores de  $b$  e o caminho reverso é escrito como  $\delta^*(\{b\}) = \{a_1, a_2, a_3\}$ .



**Figura 30:** Grafo de adjacência:  $(b_1, b_2, b_3)$  são sucessores de  $a$  e  $(a_1, a_2, a_3)$  são predecessores de  $b$ .

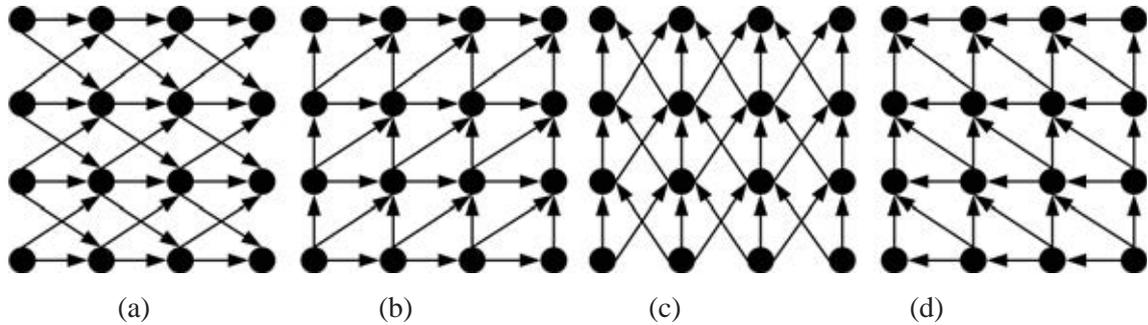
A  $L$ -tupla  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_L)$  é chamada de  $\delta$ -path de comprimento  $L$  se  $a_k \rightarrow a_{k+1}$ . Note-se que  $\mathbf{a}$  é o  $\delta$ -path de comprimento  $L$  somente se o caminho reverso  $\mathbf{a}^* = (a_L, a_{L-1}, \dots, a_1)$  é um  $\delta^*$ -path de comprimento  $L$ . O conjunto de todos  $\delta$ -path de comprimento  $L$  contidos em um subconjunto  $X$  de  $E$  é denotado por  $\Pi_L(X)$  (HEIJMANS e TALBOT, 2005).

**Definição 40:** A abertura por caminho  $\gamma_L$  é a união de todos os caminhos de comprimento  $L$  contidos em  $X$ :

$$\gamma_L(X) = \bigcup \{ \mathbf{a} \mid \mathbf{a} \in \Pi_L(X) \}. \quad (59)$$

De acordo com Valero et al. (2010), aberturas por caminho são dependentes da noção de conectividade de grafo. Para ser útil, essa conectividade deve refletir o tipo de caminho que a aplicação requer. Exemplos de grafos bastante úteis são aqueles que definem cones orientados de acordo com a direção principal do gride, como mostrados na Figura 32. Em (a) o grafo está orientado à  $0^\circ$  (ou E-W), em (b) à  $45^\circ$  (ou NE-SW), em (c) à  $90^\circ$  (ou N-S) e em (d) a orientação principal é  $135^\circ$  (NW-SE). Aberturas por caminho nestes grafos preservam caminhos cujos pontos estejam contidos dentro de um cone de  $90^\circ$  de abertura orientado na direção principal do grafo, e cujos comprimentos sejam maiores que o comprimento  $L$  considerado nas aberturas. Com isso pode-se pensar que os EEs envolvidos são *segmentos de retas flexíveis*. Embora possuam uma orientação geral, eles podem ser

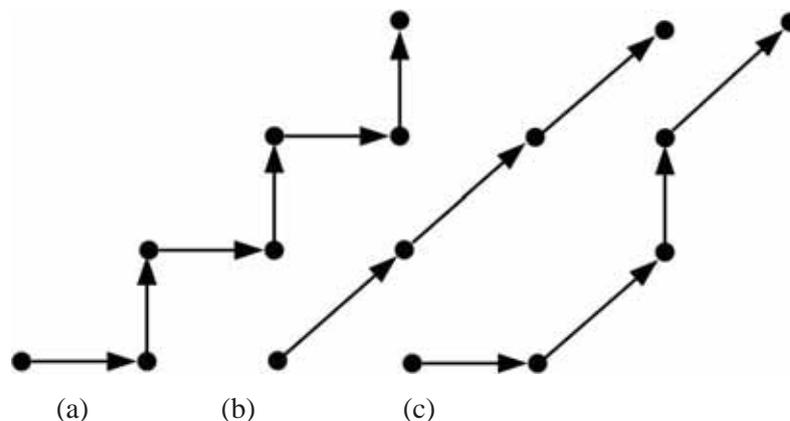
*dobrados* para se adaptarem a variações locais das estruturas numa imagem. O sumpremo das aberturas em cada uma das direções apresentadas na Figura 31 pode ser usado para reter caminhos orientados em todas as direções possíveis.



**Figura 31:** Adjacências nas direções 0° (a), 45° (b), 90° (c) e 135° (d).

A equação 62 pode ser estendida a imagens em tons de cinza pelo princípio da decomposição em limiares (definição 36) (TALBOT e APPLETON, 2007). Fechamentos por caminho podem ser definidos por dualidade e são obtidos facilmente ao se considerar o complemento ( $k_{máx} - f$ ) das imagens em tons de cinza (BUCKLEY e TALBOT, 2002).

Ao se permitir que o EE se curve dentro de um cone de 90° de abertura, caminhos diagonais podem *zigzaguear* (percorrendo, por exemplo, as direções E, N, E, N, E, N em vez de NE, NE, NE, NE, etc.). O resultado é que caminhos diagonais acabam sendo *fisicamente* mais curtos que o esperado com base na contagem dos pixels que o compõem. A Figura 32 ilustra o problema. Em (a) são utilizados 7 pixels para percorrer o caminho enquanto na situação ótima (b) apenas 4 pixels seriam necessários. Para diminuir este problema, Hendriks (2010) propôs o que ele chamou de *aberturas por caminho restritas*.



**Figura 32:** Possíveis caminhos na direção 45° (NE-SW).

Trata-se de impor uma injunção à formação dos caminhos, que funciona da seguinte maneira: ao construir um caminho na direção principal  $d$ , qualquer passo numa direção diferente de  $d$  deve ser obrigatoriamente seguido por um passo na direção principal. Voltando ao exemplo dado na Figura 32, a injunção de Hendriks amenisaria o problema do ziguezague excessivo, e apenas 5 pixels seriam precisos para descrever o caminho. O método não evita completamente o ziguezague mas reduz os efeitos indesejados a níveis aceitáveis.

A Figura 33 mostra a vantagem das aberturas por caminhos sobre outros operadores quando o objetivo é reter feições curvilineares. Neste exemplo, adaptado de Valero et al. (2010) o objetivo é eliminar os componentes circulares e preservar os lineares. A Figura 33(a) mostra a cena original. Em (b) a imagem foi filtrada por uma abertura radial (em todas as direções, com espaçamento angular de  $5^\circ$  entre elas) com um EE linear. A operação elimina os círculos mas também destrói parte de uma das linhas. Em (c) foi aplicada uma abertura por área. Como resultado, apenas o círculo menor foi filtrado e uma das linhas foi perdida. Finalmente, em (d) a abertura por caminho filtrou os componentes circulares e preservou os segmentos linear e curvilinear.

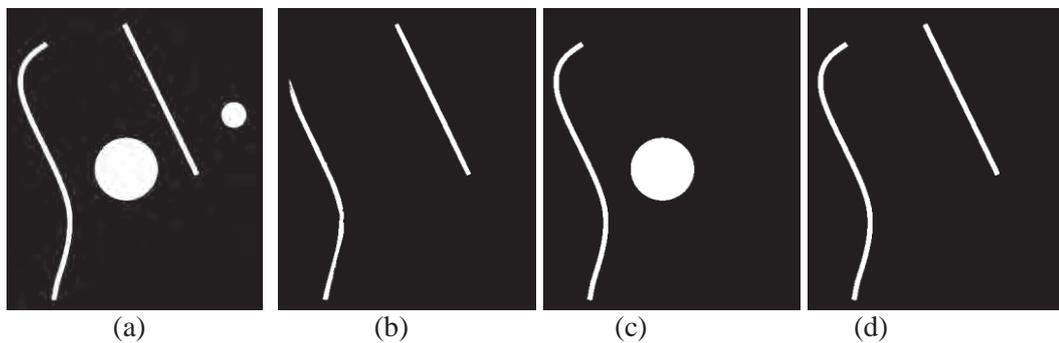


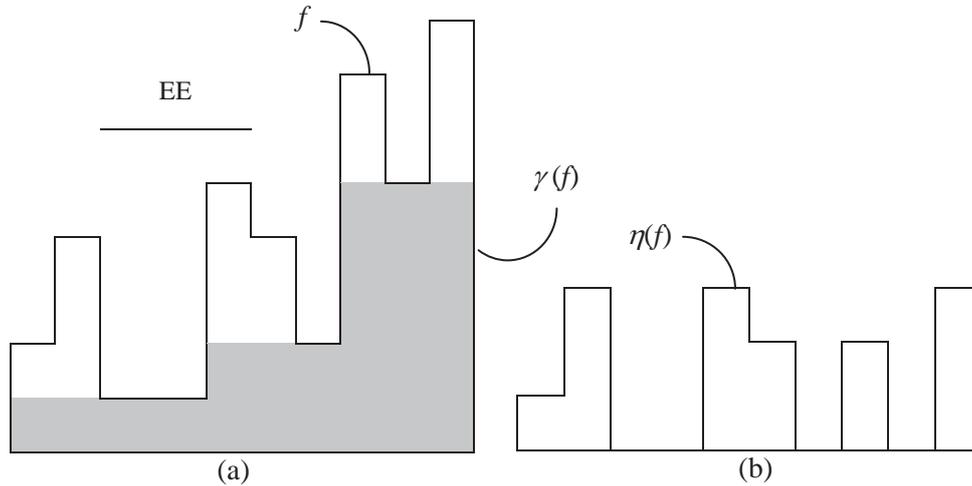
Figura 33: Exemplo de aplicação de aberturas por caminho.

As propriedades de aberturas e fechamentos, apresentadas na definição 30, podem ser exploradas na construção de operadores morfológicos por subtração conhecidos por *top-hats*. Uma abertura ou fechamento remove as estruturas da imagem que não contém o EE. Essas estruturas são recuperadas através da diferença aritmética entre a imagem original e sua abertura ou entre o fechamento e a imagem original.

**Definição 41:** Seja  $f$  uma imagem binária ou em tons de cinza e  $\gamma_B(f)$  sua abertura. O *top-hat* por abertura de  $f$ , denotado  $\eta_B(f)$ , é a diferença aritmética entre  $f$  e  $\gamma_B(f)$ :

$$\eta_B(f) = f - \gamma_B(f). \quad (60)$$

Como aberturas são anti-extensivas, os valores de  $\eta_B(f)$  são sempre maiores que zero. A Figura 34 mostra um exemplo de *top-hat* por abertura em um sinal unidimensional  $f$ .



**Figura 34:** Exemplo de *top-hat* por abertura em um sinal unidimensional.

Fonte: Adaptada de SOILLE (1999).

Nota-se pela Figura 34(b) que os componentes que não se adequaram ao EE foram extraídos da imagem, independentemente de seus valores de brilho. Soille (1999) comenta que *top-hats* por abertura são idempotentes (definição 7):

$$\begin{aligned} \eta_B[\eta_B(f)] &= f - \gamma_B(f) - \underbrace{\{\gamma_B[f - \gamma_B(f)]\}}_{\emptyset} \\ &= f - \gamma_B(f). \end{aligned} \quad (61)$$

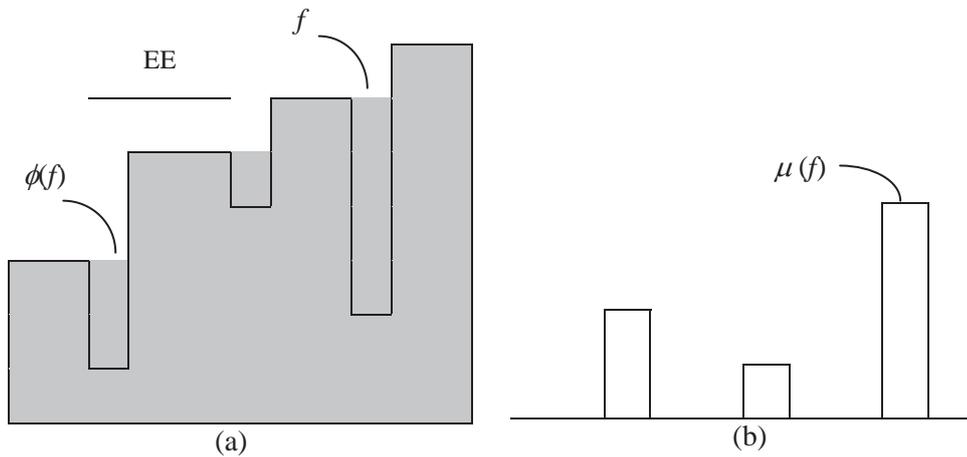
**Definição 42:** Seja  $f$  uma imagem binária ou em tons de cinza e  $\phi_B(f)$  seu fechamento. O *top-hat* por fechamento de  $f$ , denotado  $\mu_B(f)$ , é a diferença aritmética entre  $\phi_B(f)$  e  $f$ :

$$\mu_B(f) = \phi_B(f) - f. \quad (62)$$

*Top-hats* por abertura e fechamento são operadores complementários (definição 13), mas  $\mu_B(f)$  não é idempotente:

$$\begin{aligned} \mu_B[\mu_B(f)] &= \underbrace{\{\phi_B[\phi_B(f) - f]\}}_{\emptyset} - [\phi_B(f) - f] \\ &= f - \phi_B(f). \end{aligned} \tag{63}$$

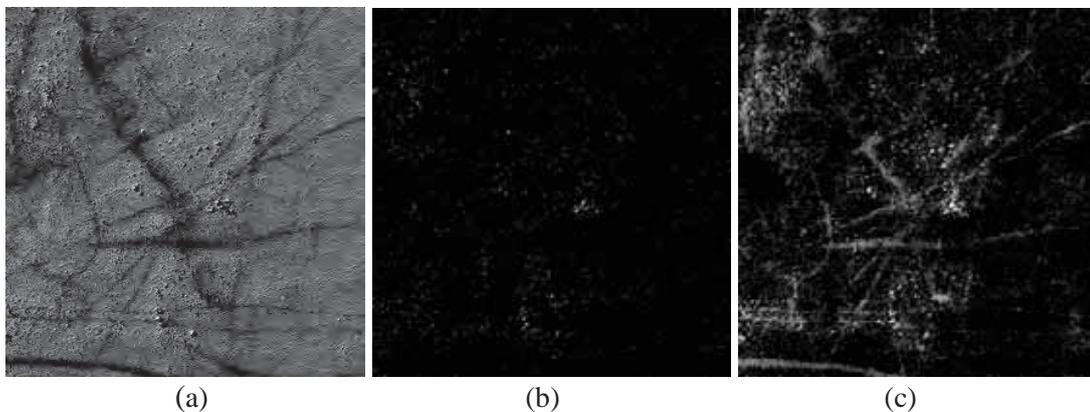
A Figura 35 ilustra um *top-hat* por fechamento em um sinal unidimensional  $f$ .



**Figura 35:** Exemplo de *top-hat* por fechamento em um sinal unidimensional.

Fonte: Adaptada de SOILLE (1999).

A forma e tamanho do EE usado para transformações *top-hat* dependem da morfologia das estruturas a serem extraídas. Por exemplo, *top-hats* com EEs muito maiores que as estruturas de interesse da imagem se comportarão como filtros *passa-alta*. A Figura 36 mostra um exemplo de *top-hat* sobre imagens em tons de cinza. A imagem original é apresentada em (a) e os *top-hats* por abertura e fechamento em (b) e (c), respectivamente.



**Figura 36:** Aplicação de *top-hats* em imagem em tons de cinza.

Fonte: NASA/JPL/University of Arizona.

Na Figura 36(b) foi utilizado um EE *caixa* de tamanho 1 e na Figura 36(c) um EE também *caixa*, mas de tamanho 10.

Uma outra maneira de se obter informação sobre os componentes de uma imagem é através da sua *covariância morfológica*, obtida a partir da erosão da imagem por um par de pontos. O resultado permite inferir informação sobre a periodicidade das estruturas e também sua direção predominante.

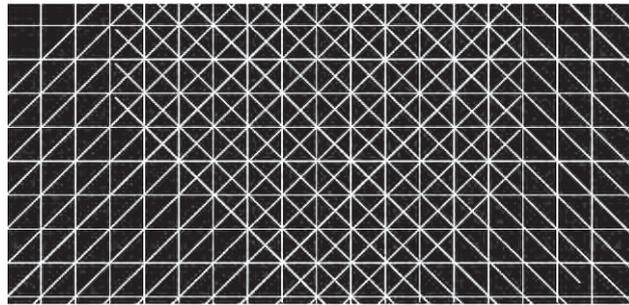
**Definição 43:** A covariância morfológica  $Cov$  de uma imagem  $f$  consiste em medir o volume da imagem erodida por um par de pontos  $P$  separados por um vetor  $v$  (SOILLE, 2004):

$$Cov(f; P, v) = \mathbb{V}[\varepsilon_{P,v}(f)]. \quad (64)$$

A covariância é analisada ao se observar o comportamento do volume da imagem erodida conforme  $v$  aumenta de tamanho. No caso binário, a covariância é a área  $A$  da interseção da imagem  $X$  com sua translação pelo vetor  $v$ :

$$Cov(X; P, v) = A(X \cap X_v). \quad (65)$$

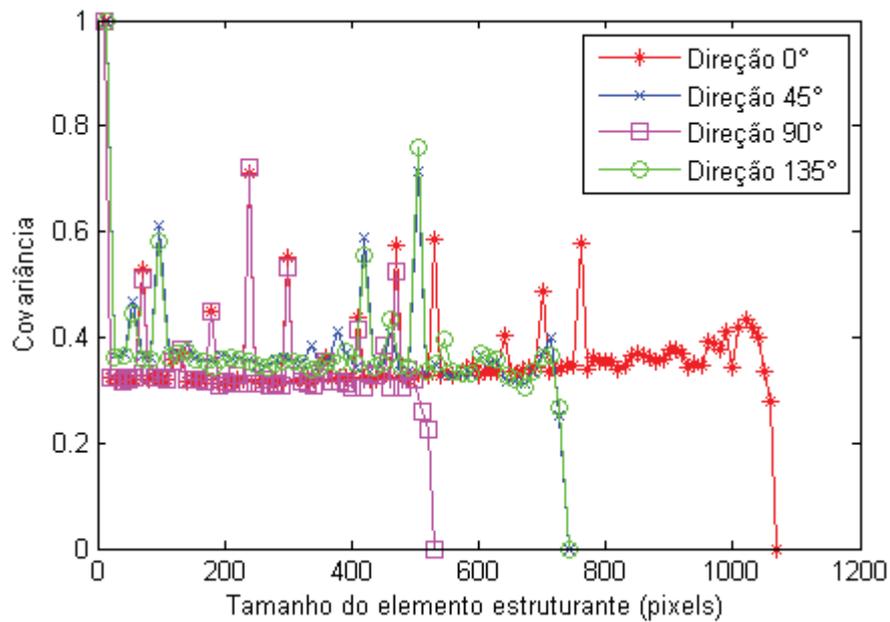
Como exemplo, a covariância morfológica para a imagem mostrada na Figura 37 foi calculada nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ .



**Figura 37:** Imagem binária criada para exemplificar a aplicação de covariância morfológica.

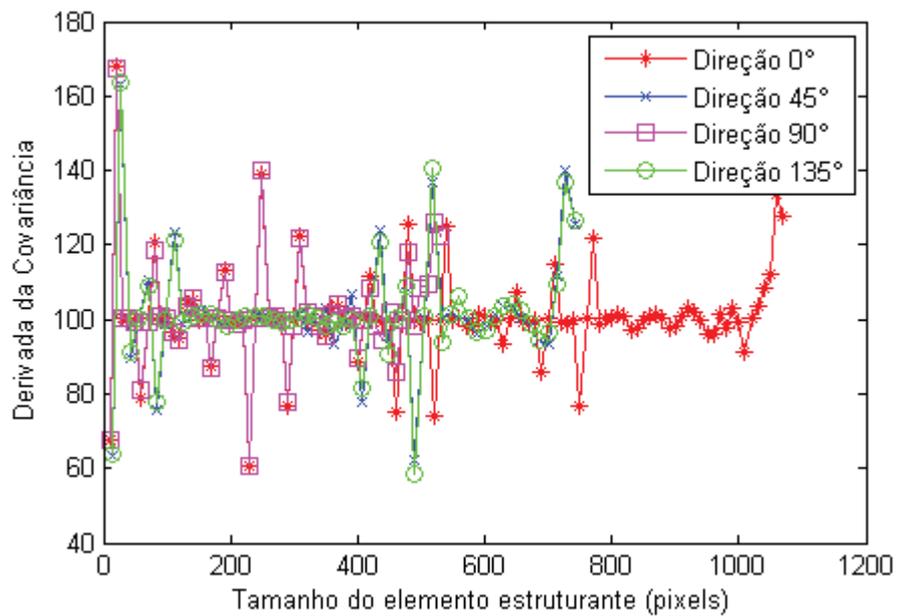
O resultado é apresentado na Figura 38, em que as covariâncias foram normalizadas para o intervalo  $[0,1]$ . Tal normalização foi feita com base na propriedade de conhecimento local (definição 6) das erosões:

$$\mathbb{V}[\varepsilon_{P,v}(f) | \varepsilon_{P,v}(D_f)] / \mathbb{V}[f | \varepsilon_{P,v}(D_f)]. \quad (66)$$



**Figura 38:** Covariância morfológica nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.

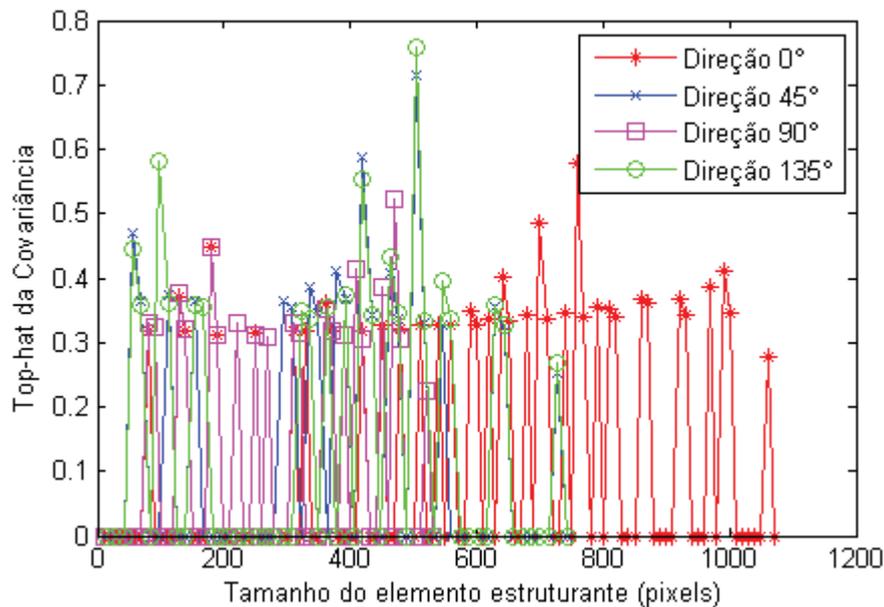
Na Figura 38, a direção de maior covariância (ou correlação, já que os dados são binários) foi 135° (~0,76), seguida da direção 45°, com a segunda maior covariância (~0,72). A análise do gráfico permite inferir também em que direção as estruturas são mais periódicas. Em tais direções o número de picos do gráfico será maior. No exemplo da Figura 38 a direção de maior periodicidade foi 0° (27 picos).



**Figura 39:** Derivadas das covariâncias.

Os picos podem ser contados automaticamente aplicando a seguinte sequência de operações: cálculo da primeira derivada para realçar as variações de frequência do gráfico (Figura 39), filtragem *top-hat* para detectar os picos (Figura 40) e, por fim, aplicação de um algoritmo de rotulação para contagem dos picos. A escala dos valores na ordenada da Figura 39 foi alterada para evitar números negativos e na Figura 40 o primeiro pico das covariâncias em todas as direções foi desconsiderado. Em geral, a aparência das covariâncias na Figura 38 é bastante semelhante em todas as direções, e daí se pode concluir que as estruturas são aproximadamente isotrópicas (SERRA, 1983).

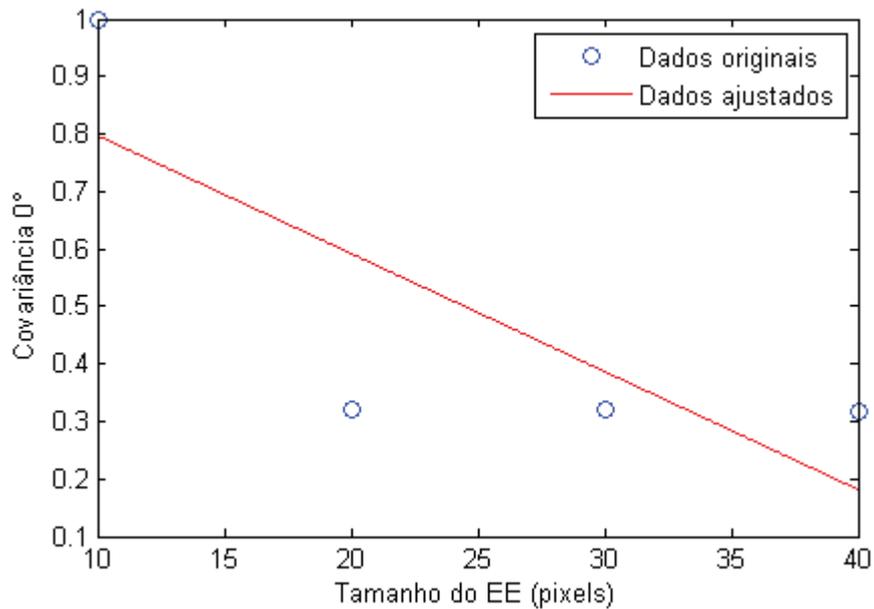
Entretanto, a análise do gráfico deve ser feita com cuidado. Variâncias periódicas resultam de processos periódicos, mas uma covariância aproximadamente periódica pode surgir de um processo completamente não-periódico. Portanto é essencial que seja feita uma análise visual preliminar das estruturas estudadas (SERRA, 1983).



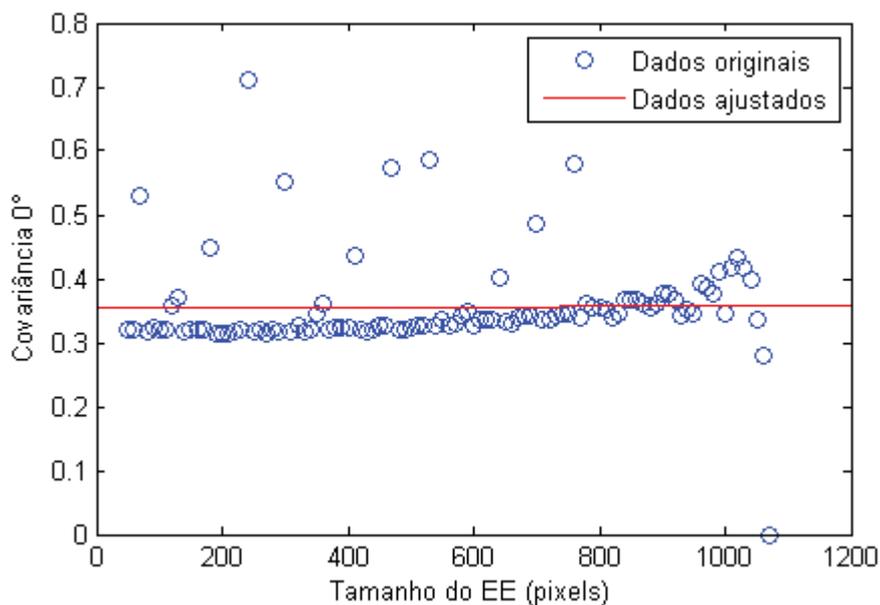
**Figura 40:** Picos das covariâncias.

Uma outra maneira de caracterizar as estruturas a partir de sua covariância é calcular a inclinação da reta tangente na origem. Serra (1983) recomenda ajustar uma reta, por mínimos quadrados, às covariâncias dos quatro primeiros pontos da abscissa do gráfico. A Figura 41 mostra o resultado para a covariância morfológica na direção 0° (E-W) calculada a partir da imagem da Figura 37. Diferenças de inclinação podem representar diferenças na distância entre duas estruturas vizinhas (uma vez que o primeiro máximo da curva de

covariância indica a distância entre dois objetos vizinhos). Também é possível calcular a inclinação a partir da qual a covariância se torna assíntota (Figura 42).



**Figura 41:** Exemplo de ajuste da reta tangente à origem da covariância.



**Figura 42:** Exemplo de ajuste da reta assíntota.

Mais informações sobre MM podem ser encontradas em trabalhos listados no capítulo sobre referências bibliográficas e também nos endereços eletrônicos <<http://mdigest.jrc.ec.europa.eu/home.aspx>>, <[http://cmm.ensmp.fr/index\\_eng.html](http://cmm.ensmp.fr/index_eng.html)> e em <<http://www.mmorph.com/>> acessados em fev. 2010.

### 2.2.3 Esqueletização de imagens

Uma importante abordagem para a representação estrutural da forma de uma região planar consiste em reduzi-la a um grafo. Essa redução pode ser realizada obtendo-se o *esqueleto* da região através de um algoritmo de afinamento. A detecção de pontos finais, pontos múltiplos e *loops* fechados de um esqueleto são importantes para muitas técnicas de reconhecimento de padrões. Muitas definições formais para o esqueleto de um conjunto Euclidiano são possíveis. Felizmente, todas elas levam a linhas finas similares. Entretanto, sua extensão a conjuntos discretos levam a uma variedade de esqueletos. Além do mais, as propriedades dos esqueletos discretos resultantes não são todas idênticas àquelas de seus equivalentes contínuos (SOILLE, 1999; GONZALEZ e WOODS, 2000). Uma das definições mais comuns para o esqueleto de uma imagem é a do *eixo médio*. Um pixel pertence ao eixo médio de um objeto se ele possuir pelo menos dois vizinhos mais próximos contidos na borda do objeto. O conceito de mais próximo depende, logicamente, da métrica empregada. A implementação direta desta definição é tipicamente proibitiva quanto a aspectos computacionais. Uma alternativa é considerar o eixo médio de um objeto como sendo o conjunto dos centros de *discos máximos* contidos no objeto. Uma formalização deste conceito é dada por Soille (2004):

**Definição 44:** Um disco  $B$  contido em um conjunto  $X$  é máximo se não existir outro disco incluído em  $X$  que contenha  $B$ . O esqueleto  $SK(X)$  do conjunto  $X$  é então o conjunto dos centros dos discos máximos em  $X$ :

$$x \in SK(X) \Leftrightarrow \exists y_1, y_2 \in \partial X \mid y_1 \neq y_2 \text{ e } d(x, \partial X) = d(x, y_1) = d(x, y_2). \quad (67)$$

Em que  $\partial X$  é a borda de  $X$  e  $d$  é uma medida de distância.

Portanto,  $B$  é máximo se tangencia ao menos dois pontos distintos da borda de  $X$ . O eixo médio de objetos a partir de discos máximos em imagens binárias pode ser encontrado com base em transformações morfológicas de erosão e *top-hat* por abertura. Porém, o esqueleto gerado altera a conectividade dos objetos, efeito indesejável para certas aplicações (SOILLE, 2004; MCANDREW, 2004). Alternativamente, esqueletos cuja homotopia (ver

definição 15) é preservada podem ser obtidos pela transformação de *afinamento morfológico*, cuja definição se apóia no operador *hit-or-miss*:

**Definição 45:** A transformação *hit-or-miss* de um conjunto  $X$  por um EE composto  $B = (B_1, B_2)$  é o conjunto de pontos  $x$  tais que quando a origem de  $B$  coincide com  $x$ ,  $B_1$  está contido em  $X$  e  $B_2$  está contido em  $X^C$ :

$$HMT_B(X) = \varepsilon_{B_1}(X) \cap \varepsilon_{B_2}(X^C). \quad (68)$$

A transformação definida pela equação 68 é de interesse para aplicações em que a extração de pixels da imagem leva em conta não só a configuração da estrutura relevante, mas também a configuração dos pixels de fundo que formam a vizinhança da estrutura. São utilizados então dois EEs: um para testar os pixels relevantes e outro para testar sua vizinhança. Segundo Facon (1996), os elementos precisam ser disjuntos (ou o resultado da transformação é o conjunto vazio) e ambos devem ter a mesma origem embora esta não esteja contida em  $B_2$  (já que  $B_1 \cap B_2 = \emptyset$ ).

**Definição 46:** O afinamento morfológico de um conjunto ou imagem binária  $X$  por um EE composto é a diferença entre  $X$  e a transformação *hit-or-miss* de  $X$ :

$$AFI_B(X) = X / HMT_B(X). \quad (69)$$

Para afinar morfológicamente um conjunto sem alterar sua homotopia são utilizados, por exemplo, as seguintes configurações de vizinhança:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante para testar pixels relevantes } (B_1).$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante para testar pixels de fundo } (B_2).$$

Existe uma representação mais compacta para o par  $(B_1, B_2)$ , utilizando uma única matriz em que os pixels ativos de  $B_1$  são denotados por “1”, os pixels ativos de  $B_2$  são denotados por “0” e os pixels que não interagem com a imagem por “.”:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ . & \mathbf{1} & . \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} : \text{Par de elementos estruturantes } (B_1, B_2).$$

A fim de processar a imagem de maneira simétrica, em todas as direções, são utilizadas as rotações do par  $(B_1, B_2)$ :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ . & \mathbf{1} & . \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} . & 0 & 0 \\ 1 & \mathbf{1} & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & . & 0 \\ 1 & \mathbf{1} & 0 \\ 1 & . & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & . \\ 1 & \mathbf{1} & 0 \\ . & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ . & \mathbf{1} & . \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} . & 1 & 1 \\ 0 & \mathbf{1} & 1 \\ 0 & 0 & . \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & . & 1 \\ 0 & \mathbf{1} & 1 \\ 0 & . & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & . \\ 0 & \mathbf{1} & 1 \\ . & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Os processos de esqueletização por discos máximos e por afinamento morfológico fazem aparecer, nas imagens finais, as linhas genéricas representativas dos objetos originais, mas também segmentos de tamanho reduzido, aderidos às estruturas principais da imagem, que são o resultado do processo sobre as extremidades das entidades. Uma maneira de amenizar este efeito é fazer o *pruning* do esqueleto. O objetivo desse processo é tirar, a partir de uma imagem já afinada, os pontos extremos. Ao contrário do afinamento, o *pruning* não preserva a homotopia. A continuidade do processo pode resultar em uma redução ou até em uma destruição parcial da imagem afinada. Por isso, o número de ciclos no processo de *pruning* deve ser predeterminado (FACON, 1996).

A fim de aplicar a transformação de *pruning* a uma imagem, o seguinte elemento estruturante pode ser utilizado:

$$\begin{bmatrix} . & . & . \\ 0 & \mathbf{1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} : \text{Elemento estruturante apropriado para } \textit{pruning} (B_p).$$

Para que a poda seja feita em todas as direções, o elemento  $B_p$  precisa ser aplicado em todas as rotações  $\theta$  possíveis.

**Definição 47:** O *pruning* de tamanho  $n$  de um esqueleto  $X$  nas direções  $\theta$  consiste em remover  $n$  pixels de cada extremidade de  $X$  nas direções consideradas:

$$PRUNE^{(n)}(X) = [AFI_{Bp}^{\theta}(X)]^{(n)}. \quad (70)$$

Zhang e Suen (1984) propuseram um algoritmo que busca contornar o problema da segmentação excessiva após processos de esqueletização. Semelhantemente ao afinamento morfológico, o método consiste em remover *pontos de contorno* dos objetos até que restem apenas aqueles pixels pertencentes a seus esqueletos. Um ponto de contorno é um pixel relevante (valor 1) que possua ao menos um vizinho como pixel de fundo (valor 0).

Sejam os vizinhos de um pixel  $p_1$  (considerando a conectividade dada pelo EE *caixa*) rotulados como segue:

$$\begin{array}{ccc} p_9 & p_2 & p_3 \\ p_8 & p_1 & p_4 \\ p_7 & p_6 & p_5 \end{array}$$

Para que a conectividade do esqueleto seja preservada, cada iteração do algoritmo é dividida em duas etapas. Na primeira, o ponto de contorno  $p_1$  é removido do objeto se ele satisfaz as condições:

- a)  $2 \leq B(p_1) \leq 6$ .
- b)  $A(p_1) = 1$ .
- c)  $p_2 \cdot p_4 \cdot p_6 = 0$ .
- d)  $p_4 \cdot p_6 \cdot p_8 = 0$ .

Em que  $A(p_1)$  é o número de sequências “01” que aparecem no conjunto ordenado  $(p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9)$  e  $B(p_1)$  é o número de pixels relevantes dentre os vizinhos de  $p_1$ .

Se qualquer uma das condições não é satisfeita, então  $p_1$  não é removido do objeto. Na segunda etapa as condições (a) e (b) permanecem as mesmas e as condições (c) e (d) são alteradas para:

$$c') p_2 \cdot p_4 \cdot p_8 = 0.$$

$$d') p_2 \cdot p_6 \cdot p_8 = 0.$$

O processo é iterado até a estabilidade, ou seja, até não haver mais pixels a serem removidos do objeto. A condição (a) garante que o ponto a ser removido não seja um ponto final do esqueleto, caso em que  $p_1$  possui apenas um vizinho relevante; e que a remoção de um ponto de contorno não crie um buraco no objeto, caso em que  $p_1$  possui oito vizinhos relevantes. Já a eliminação de um pixel com sete vizinhos relevantes provocaria a erosão do objeto. A condição (b) é aplicada quando se tratar de pontos pertencentes a segmentos com um pixel de largura, prevenindo a desconexão de segmentos do esqueleto. As condições (c) e (d) testam se o pixel  $p_1$  é um ponto de fronteira leste, sul ou um ponto de canto a noroeste na fronteira. As condições (c') e (d') testam se o pixel  $p_1$  está fronteira norte, oeste ou se é um ponto de canto a sudeste (GONZALEZ e WOODS, 2000; MCANDREW, 2004).

A Figura 43 apresenta um conjunto (a) cujo esqueleto foi obtido por discos máximos (b), afinamento morfológico (c) e pelo algoritmo de Zhang-Suen (d).

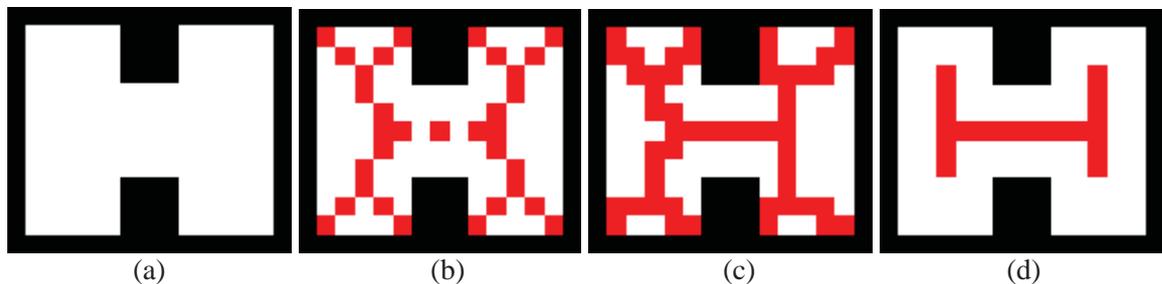


Figura 43: Comparação entre processos de esqueletização.

### 2.3 Visão geral do planeta Marte

Marte é conhecido e estudado desde a antiguidade. Durante a Renascença seu movimento retrógrado serviu como evidência essencial ao modelo heliocêntrico de Copérnico para o sistema solar, e sua órbita relativamente elíptica levou Kepler a rejeitar o modelo de esferas concêntricas, antes proposto por Ptolomeu, em favor de órbitas elípticas para os planetas. Até o século XIX, quando grandes telescópios foram desenvolvidos, não era possível observar o planeta em detalhe. Mesmo então, as observações feitas da Terra davam uma idéia muito pálida da realidade física do planeta, levando pesquisadores a fazerem

interpretações tão espalhafatosas que hoje parecem coisa de ficção científica. Como exemplo, tempestades de areia eram interpretadas como mudanças na cobertura vegetal da superfície, e teorias sobre civilizações avançadas começaram a surgir (O'KEEFER, 2004).

O fascínio pelo planeta vermelho perdura até os dias de hoje, e desde as primeiras tentativas de observar Marte ainda no século XIX, várias missões científicas tem sido executadas com intuito de estudá-lo. Dentre as mais recentes e bem sucedidas estão as missões *Mars Global Surveyor* e *Mars Reconnaissance Orbiter* que proporcionaram um mapeamento total da superfície do planeta. Uma relação completa das missões executadas pela NASA é encontrada em <http://mars.jpl.nasa.gov/missions/> (acesso em: jun. de 2009).

Em NASA (1997), Barlow (2008) e Taylor (2010) são relatadas algumas das principais características de Marte, dentre elas:

- Diâmetro médio de 6.794 km, aproximadamente metade do diâmetro da Terra;
- Massa igual a 1/10 da massa da Terra;
- Gravidade equivalente a 38% da gravidade da Terra;
- Densidade 3,9 vezes maior que a da água (a densidade da Terra é 5,5 vezes maior que a da água);
- Ocupa a quarta órbita a partir do Sol;
- Órbita elíptica, com distância ao sol variando de 206,7 milhões de km a 249,2 milhões de km;
- Translação em torno do sol uma vez a cada 687 dias terrenos (ano marciano);
- Eixo de rotação inclinado a 25° criando estações parecidas com as da Terra;
- Atmosfera composta de dióxido de carbono (95,3%), nitrogênio (2,7%) e argônio (1,6%);
- Pressão atmosférica menor que 1/100 da terrestre;
- Temperatura variando de -128° C durante a noite a 27° C ao meio dia;
- Possui duas luas: *Phobos* e *Deimos* (na mitologia grega, filhos do deus da guerra Marte).

Citando NASA (2009), a exploração de Marte ocorreu até o presente momento em três estágios:

*Flybys*: instrumentos que capturam dados do planeta quando o sobrevoam, mas que não o orbitam. Exemplos deste tipo de missão: *Mariners* 3 e 4 (1964), 6 e 7 (1969);

*Orbiters*: sondas que se estabelecem em órbita de Marte por longos períodos, possibilitando estudos globais do planeta. Algumas missões orbitais bem sucedidas deste tipo foram: *Mariner 9* (1971), *Vikings 1 e 2* (1975), *Mars Global Surveyor* (MGS) (1996), *2001 Mars Odyssey* (2001), *Mars Express* (2003) e *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) (2005);

*Landers/Rovers*: instrumentos móveis pousados na superfície do planeta. Missões bem sucedidas desse tipo incluem: *Pathfinder* (1996), *Mars Exploration Rovers* (2003), e *Phoenix* (2007).

E os próximos desafios são a exploração da subsuperfície e a coleta de amostras de solo para análise em laboratórios na Terra ou em estações espaciais.

As origens de Marte são provavelmente muito similares às da Terra e teorias sugerem que em seus primórdios ele pode ter sido muito mais quente, úmido e envolto em uma atmosfera mais densa. Na Terra, evidência de vida pode ser encontrada em rochas com idade geológica de quatro bilhões de anos. Superfícies em Marte com a mesma idade apresentam vestígios de lagos antigos, sugerindo que água líquida existiu ali em algum momento e que o clima era mais parecido com o da Terra. Futuras explorações podem revelar se algum tipo de vida se desenvolveu em Marte em algum ponto remoto de sua história, e também fornecer um melhor entendimento sobre eventos que a humanidade possivelmente enfrentará no futuro, conforme o desenvolvimento do planeta em que vive. Em resumo, se a ciência for capaz de entender os principais fatores que governam mudanças climáticas em outro planeta, ela também será capaz de prever as consequências de mudanças naturais e induzidas pela raça humana na Terra (NASA, 1997; TAYLOR, 2008).

### **2.3.1 Sistema de Referência Geodésico**

Tal como para a Terra, foram estabelecidos para Marte um Sistema de Referência Inercial (SRI) e um Sistema de Referência Fixo (SRF) ao planeta. O eixo *X* do SRF aponta para o meridiano principal de Marte, o qual é materializado pelo centro de uma pequena cratera nomeada *Airy-0*, enquanto o eixo *Z* coincide com o eixo de rotação do planeta e o eixo *Y* é definido de maneira a tornar o sistema dextrógiro. O elipsóide adotado para representação da forma do planeta é biaxial, com centro geométrico coincidente com o centro de massa de

Marte. Este elipsóide de referência possui raio equatorial  $a = 3.396.190$  m e um raio polar  $b = 3.376.200$  m, ambos determinados com precisão de 100 m.

Com relação ao sistema de coordenadas, a União Astronômica Internacional (IAU no inglês) formalizou em 1970 o uso de dois tipos de sistemas para planetas:

- a) *Sistema planetocêntrico*, caracterizado por longitudes positivas ao Leste (sistema dextrógero) e latitudes *planetocêntricas*, definidas como o ângulo entre o plano equatorial e o vetor que liga o centro do planeta ao local considerado;
- b) *Sistema planetográfico*, caracterizado por longitudes positivas na direção oposta àquela de rotação do planeta (assim como a Terra, Marte rotaciona em sentido anti-horário, portanto, neste sistema, as longitudes são contadas positivas ao Oeste) e latitudes *planetográficas*, definidas como o ângulo entre o plano do equador e a normal passante pelo local considerado.

Duxbury et al. (2002) comentam que a maioria dos produtos cartográficos feitos entre 1970 e o final da década de 1990 usavam o sistema planetográfico. Porém, o mapeamento mais preciso de Marte (realizado em 2001) derivado de observações MOLA (*Mars Orbiter Laser Altimeter*) utiliza o sistema planetocêntrico, e a tendência futura é que este sistema seja o adotado para especificação de coordenadas no planeta. Porém, nota-se que ainda há uma falta de rigor na adoção de sistemas de coordenadas no georreferenciamento de imagens orbitais de Marte. Como exemplo, imagens HiRISE disponibilizadas pela Universidade do Arizona em <http://hirise.lpl.arizona.edu/> encontram-se no sistema planetocêntrico, enquanto imagens MOC, disponibilizadas pelo *Malin Space Science Systems* em [http://www.msss.com/moc\\_gallery](http://www.msss.com/moc_gallery) estão no sistema planetográfico. Sempre que possível o sistema de coordenadas adotado neste trabalho será o planetocêntrico, com latitude e longitude sendo designadas, respectivamente, por  $\varphi$  e  $\lambda$ . Quando este sistema não puder ser utilizado, tal fato será comentado no texto.

Maiores informações sobre sistemas de referência terrestres podem ser encontradas em Monico (2008) e sobre sistemas de referência marcianos em Batson, Bridges e Inge (1979), Duxbury et al. (2002), O’Keefer (2004) e Greeley e Batson (2007).

### **2.3.2 Cartografia de Marte**

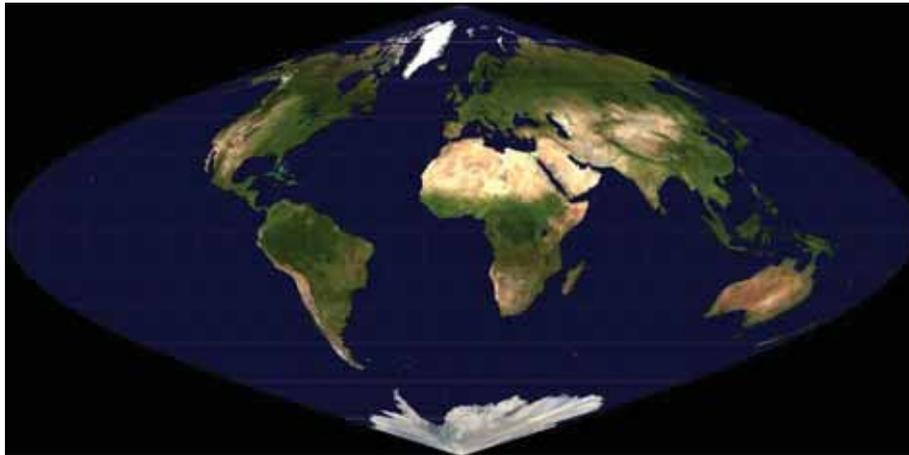
No mapeamento sistemático de Marte, feito pelo *U.S. Geological Survey* (USGS), o planeta é dividido em 30 retângulos, representados na escala 1:5.000.000. A escolha da escala foi feita de acordo com a resolução espacial de 1 km das imagens *Mariner 9*, que serviram de base para o mapeamento. No planejamento cartográfico estipulou-se que a escala dos retângulos usados no mapeamento sistemático deveria ser suficientemente grande para que qualquer feição identificável nas imagens, e que pudesse ser classificada geologicamente, fosse visível, também, quando projetada no mapa. Assumindo-se que são necessários 5 a 8 elementos de resolução pra a classificação geológica de uma feição, e que esta deveria ter um tamanho mínimo de 1 mm no mapa, a escala de 1:5.000.000 foi eleita para representar a superfície marciana (BATSON, BRIDGES e INGE, 1979).

Os primeiros mapeamentos utilizavam as seguintes projeções: projeção de *Mercator*, entre as latitudes de 30° S a 30° N; projeção *Cônica Conforme de Lambert*, entre as latitudes de 30° S a 65° S e de 30° N a 65° N; e projeção *Polar Estereográfica*, para mapeamento das regiões polares (BATSON, BRIDGES e INGE, 1979). O mapeamento mais atual, e também mais preciso, realizado pelo USGS, adotou a projeção *Equirretangular* para os 30 retângulos. O mosaico, disponível em <http://astrogeology.usgs.gov/Projects/MDIM21>, utiliza aproximadamente 4.600 imagens *Viking* com resolução espacial de 231 m. A acurácia na posição das feições é de 200 m (DUXBURY et al., 2002; ARCHINAL et al., 2003; ASTROGEOLOGY, 2009).

De maneira semelhante ao que ocorre com os sistemas de coordenadas, a despeito das recomendações feitas pelo IAU, não há um rigor na adoção do sistema de projeção. Dependendo da escala do produto e do centro de pesquisa envolvido, outras projeções podem ser utilizadas. É o caso das imagens MOC, processadas e disponibilizadas em projeção *Polar Estereográfica* e *Sinusoidal* pelo *Malin Space Science Systems*. Quanto às imagens HiRISE, processadas pela Universidade do Arizona, as projeções adotadas são a *Equirretangular* e a *Polar Estereográfica*.

### 2.3.2.1 Projeção Sinusoidal

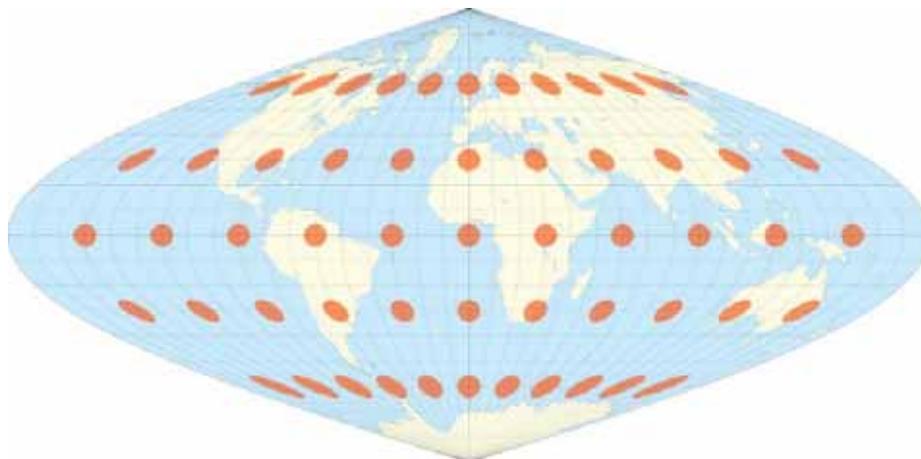
A projeção Sinusoidal, cujo aspecto é mostrado na Figura 44, é geralmente classificada como *pseudo-cilíndrica* em razão de sua similaridade com as projeções cilíndricas. Em seu aspecto *normal*, os paralelos são linhas retas igualmente espaçadas e o meridiano central é uma linha reta que os cruza perpendicularmente. O espaçamento dos paralelos é proporcional ao *coseno* das latitudes e, portanto, os meridianos formam curvas sinusoidais. A propriedade preservada é a *equivalência*. Nesta projeção, a escala é livre de distorções ao longo do meridiano central e dos paralelos (SNYDER, 1926). A Figura 45 mostra a *indicatriz de Tissot* (ou *elipse de distorção*) para vários pontos da projeção.



**Figura 44:** Aspecto da projeção Sinusoidal.

Fonte: disponível em: <<http://users.info.unicaen.fr/~karczma/TEACH/InfoGeo/Images/>>.

Acesso em: fev. 2011.



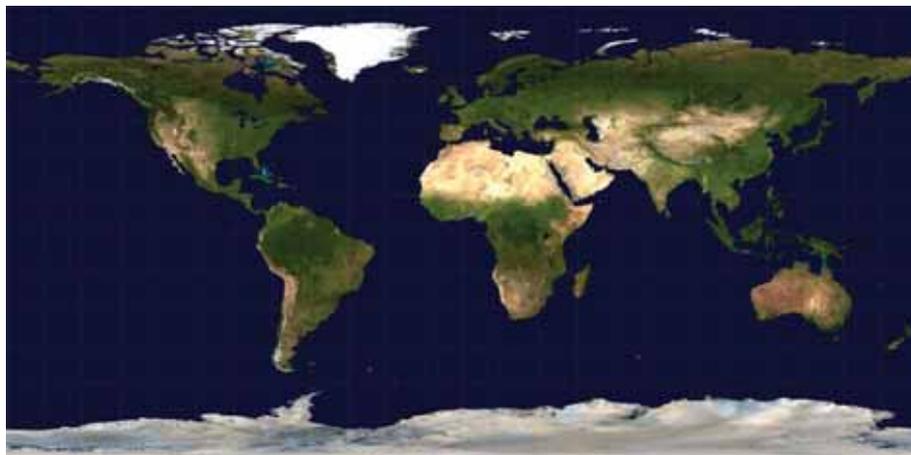
**Figura 45:** Indicatriz de Tissot em vários pontos da projeção Sinusoidal.

Fonte: disponível em: <<http://users.info.unicaen.fr/~karczma/TEACH/InfoGeo/Images/>>.

Acesso em: fev. 2011.

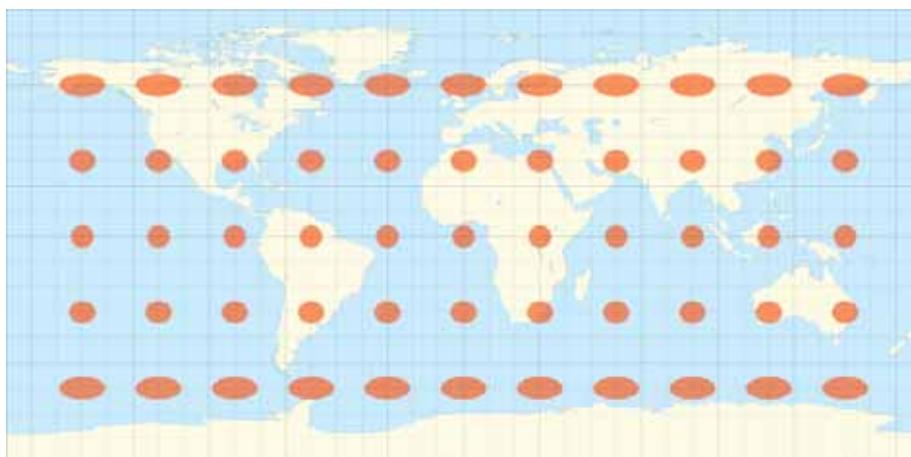
### 2.3.2.2 Projeção Equirretangular

A projeção Equirretangular (Figura 46), também conhecida como *Plate Carrée*, é uma projeção *equidistante cilíndrica*, isto é, a superfície de projeção adotada é um cilindro e a propriedade preservada é a equidistância ao longo de determinada direção, neste caso, ao longo dos meridianos. É uma das mais simples e antigas projeções, proposta por Eratosthenes. Os paralelos e meridianos são linhas retas paralelas, equidistantes entre si e que se cruzam em ângulos retos (SNYDER, 1926). A Figura 47 mostra a indicatriz de Tissot para vários pontos da projeção Equirretangular.



**Figura 46:** Aspecto da projeção Equirretangular.

Fonte: disponível em: <<http://users.info.unicaen.fr/~karczma/TEACH/InfoGeo/Images/>>. Acesso em: fev. 2011.



**Figura 47:** Indicatriz de Tissot para diversos pontos da projeção Equirretangular.

Fonte: disponível em: <<http://users.info.unicaen.fr/~karczma/TEACH/InfoGeo/Images/>>. Acesso em: mai. 2011.

## 2.4 Sensoriamento Remoto de Marte

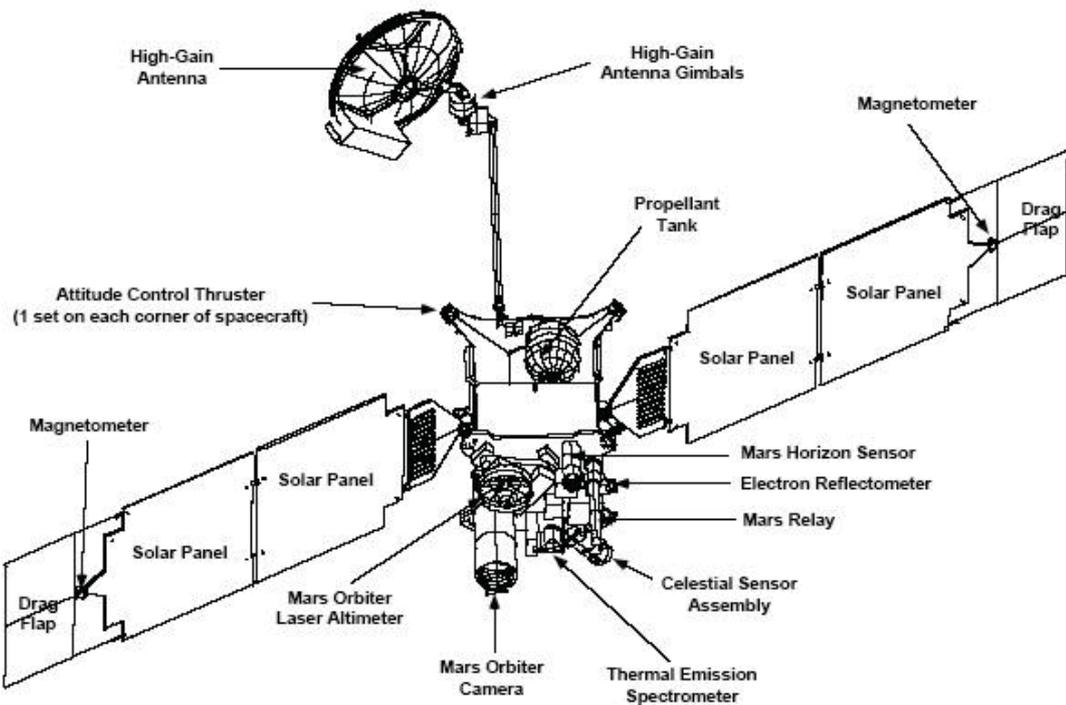
Destacando-se no céu noturno por seu aspecto avermelhado, Marte é visível a olho nu, razão pela qual tem sido observado desde a antiguidade por babilônios, gregos e egípcios. Segundo Newman (2001), as observações de Marte feitas por telescópio principiaram com Galileo Galilei em 1.609. As primeiras tempestades de areia foram observadas no início do século XIX e fotografias ou imagens com boa qualidade se tornaram possíveis apenas no século XX. A exploração do planeta a partir de espaçonaves e satélites começou no início dos anos 70 e se estende aos dias atuais.

Dentre as missões mais recentes enviadas ao planeta Marte, destacam-se *Mars Global Surveyor* (MGS) e *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), que forneceram um imageamento quase completo do planeta. De acordo com a NASA (1997), a MGS foi lançada em 7 de novembro de 1996 da base aérea de Cabo Canaveral – EUA, a bordo do veículo de lançamento Delta II.

Os objetivos da missão eram:

- Caracterizar os processos geológicos em Marte;
- Determinar a composição, distribuição e propriedades físicas de minerais, rochas e gelo na superfície do planeta;
- Determinar a topografia, forma e campo de gravidade do planeta;
- Estabelecer a natureza do campo magnético;
- Monitorar o clima e atmosfera;
- Estudar as interações entre a superfície de Marte e a atmosfera.

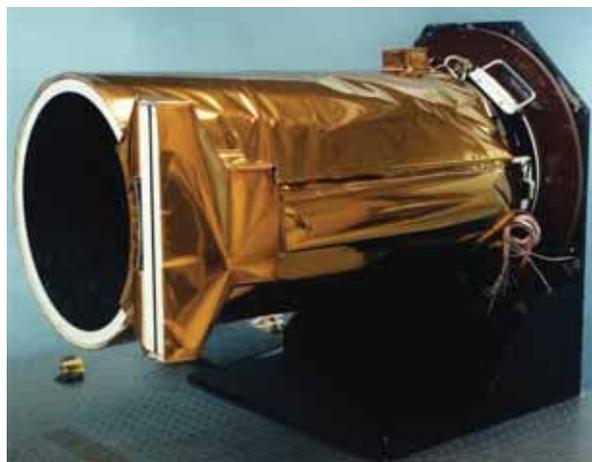
Informações geradas pela MGS serviram como base para o planejamento de outras missões enviadas a Marte. A órbita final de mapeamento era aproximadamente circular, 378 km em média acima do planeta. A bordo da MGS, mostrada na Figura 48, há seis instrumentos científicos: *Thermal Emission Spectrometer*, *Mars Orbiter Laser Altimeter*, *Magnetometer/Electron Reflectometer*, *Radio Science*, *Mars Orbiter Camera* e *Mars Relay System*.



**Figura 48:** Instrumentos da missão MGS.

Fonte: NASA (1997).

A *Mars Orbiter Camera* (MOC) era composta de três instrumentos: uma câmera de abertura angular pequena que coletava imagens pancromáticas ( $\sim 0,5 - 0,9 \mu\text{m}$ ) de alta resolução (geralmente 1,5 a 12 metros por pixel) e duas câmeras grande-angulares que coletavam dados nas faixas espectrais do azul ( $\sim 0,4 - 0,5 \mu\text{m}$ ) e vermelho ( $\sim 0,6 - 0,7 \mu\text{m}$ ), com resolução espacial variando de 240 m a 7,5 km para mapeamento global diário (NASA, 2009). A Figura 49 mostra o instrumento que foi a bordo da MGS.



**Figura 49:** Instrumento MOC.

Fonte: disponível em: <<http://www.msss.com/mgs/moc/index.html>>

Acesso em: fev. 2010.

A MOC operou em órbita de Marte entre setembro de 1997 e novembro de 2006, e adquiriu mais de 240.000 imagens, uma das quais é exibida na Figura 50.



**Figura 50:** Imagem MOC, câmera grande-angular, canal vermelho.

Fonte: disponível em: <[http://www.msss.com/moc\\_gallery/e19\\_r02/images/E19/E1900600.html](http://www.msss.com/moc_gallery/e19_r02/images/E19/E1900600.html)>  
Acesso em: fev. 2010.

A Figura 50 mostra uma imagem da câmera grande-angular, canal vermelho, da MOC, adquirida em agosto de 2002. As coordenadas (latitude  $\varphi$  e longitude  $\lambda$ ) do centro da cena são  $\varphi = 28,19^\circ$  S e  $\lambda = 314,07^\circ$  W. A resolução espacial é de aproximadamente 247 m. Mais informações sobre a missão MGS podem encontradas em NASA (1997).

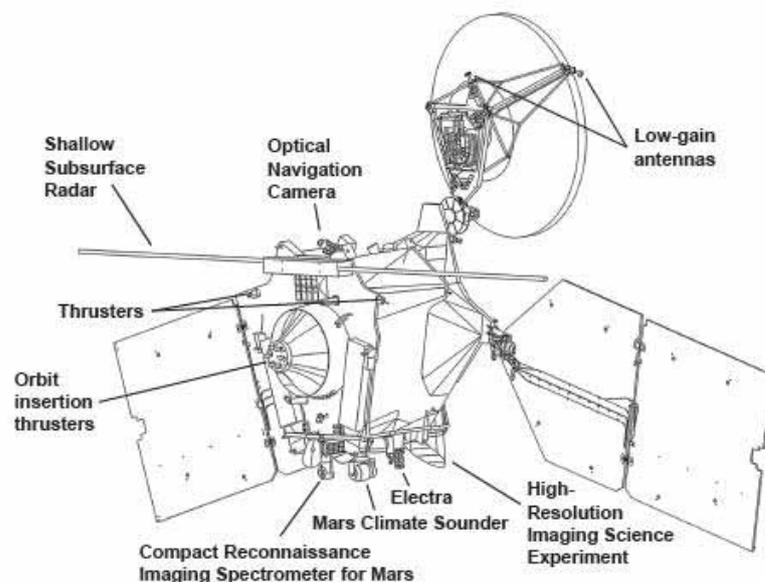
Os nomes atribuídos às imagens MOC seguem o padrão *ppp-ooooo.img* (as imagens também estão disponíveis nos formatos *gif* e *jpg*, dependendo do produto). Os 3 primeiros caracteres são alfa-numéricos e indicam a fase e sub-fase da missão. Os 5 caracteres posteriores ao hífen são numéricos e descrevem o número da órbita e a sequência de aquisição de imagens. Os caracteres *ppp* podem assumir os valores M00-M23 (*mapping mission*), E01-E23 (*extended mission*), R01-R23 (*relay mission*), S01-S23 (*science and support mission*), dentre outros. A porção numérica dos caracteres *ppp* designa o mês da missão. Como exemplo, o nome M03-01106.img designa a sexta imagem adquirida no terceiro mês da fase de mapeamento, na órbita 11. Mais informações podem ser encontradas em [http://www.msss.com/moc\\_gallery/moc\\_subphases.html](http://www.msss.com/moc_gallery/moc_subphases.html), acesso em mai. 2011.

Em 12 de agosto de 2005, em Cabo Canaveral – EUA, era lançado o satélite *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), a bordo do veículo de lançamento Atlas V-401. A uma altitude de aproximadamente 300 km acima da superfície marciana a MRO atingiu sua órbita

final em 10 de março de 2006 e desde então orbita o planeta para cumprir os seguintes objetivos, de acordo com NASA (2006):

- Estimar variações sazonais e diárias do conteúdo de água, poeira e dióxido de carbono na atmosfera;
- Caracterizar a estrutura global da atmosfera e mudanças na superfície;
- Procurar regiões onde existam evidências de água ou atividade hidrotermal;
- Examinar detalhadamente a estratigrafia, as estruturas geológicas e a composição de feições da superfície do planeta;
- Examinar camadas do subsolo, reservatórios de água ou gelo e a estrutura interna das calotas polares;
- Mapear e monitorar o campo de gravidade de Marte para aprimorar o conhecimento sobre a crosta do planeta e variações em sua massa atmosférica;
- Identificar e caracterizar áreas com grande potencial para novas descobertas em missões futuras.

A bordo do satélite MRO, mostrado na Figura 51, estão seis instrumentos científicos: *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE), *Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* (CRISM), *Context Camera* (CC), *Mars Color Imager* (MCI), *Mars Climate Sounder* (MCS) e *Shallow Subsurface Radar* (SSR).



**Figura 51:** Instrumentos da missão MRO.

Fonte: NASA (2006).

De especial interesse entre os instrumentos carregados pelo MRO, a câmera HiRISE (Figura 52) foi construída com objetivo de permitir a identificação de feições da superfície de Marte a uma resolução espacial de 30 cm. Com 70 cm de diâmetro e 1,4 m de comprimento a câmera gera imagens em três faixas do espectro eletromagnético: azul/verde ( $\sim 0,4 - 0,6 \mu\text{m}$ ), vermelho ( $\sim 0,55 - 0,85 \mu\text{m}$ ) e infravermelho próximo ( $\sim 0,8 - 1 \mu\text{m}$ ).

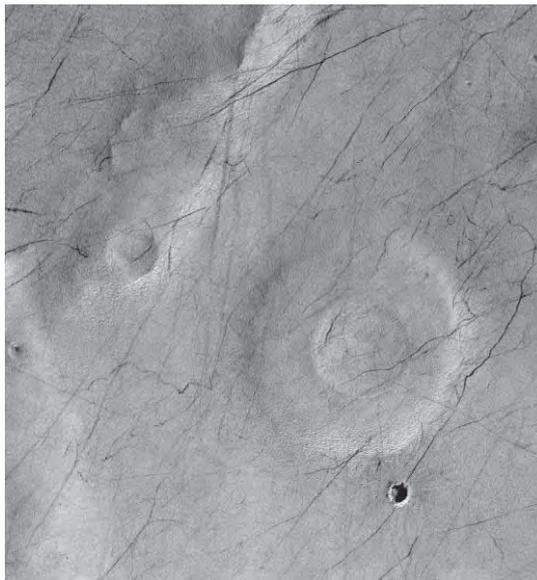


**Figura 52:** Câmera HiRISE.

Fonte: disponível em: < <http://marsoweb.nas.nasa.gov/HiRISE/instrument.html#specs> >

Acesso em: mar. 2010.

A missão do MRO foi prevista para durar até dezembro de 2010, mas ainda encontra-se em funcionamento (2012). A Figura 53 exibe uma imagem HiRISE na faixa espectral do vermelho.



**Figura 53:** Imagem HiRISE.

Fonte: disponível em: < <http://hirise.lpl.arizona.edu/index.php> >

Acesso em: fev. 2010.

Os nomes atribuídos às imagens HiRISE seguem o padrão *ppp\_ooooo\_tttt\_ffff\_c.img* (as imagens também estão disponíveis nos formatos *jpg* e *jp2*, dependendo do produto). Os caracteres *ppp* (alfa-numéricos) indicam a fase e sub-fase da missão, os caracteres *ooooo* (numéricos) indicam o número da órbita da MRO, os caracteres *tttt* (numéricos) descrevem a posição do alvo imageado, variando de 0° a 359°, com origem no equador (com uma casa decimal de precisão); os caracteres *ffff* (alfa-numéricos) descrevem o filtro utilizado e *c* é o número do canal do sensor CCD (0 ou 1). Os caracteres *ppp* podem assumir os valores AEB (*aerobraking*), PSP (*primary science orbit*), E01 (*first extended mission phase*) e Exx (*additional extended missions*), dentre outros. Os caracteres *ffff* podem assumir os valores RED0-RED9 (filtros vermelhos), IR10-IR11 (filtros infravermelhos) e BG12-BG13 (filtros combinados azul/verde). Como exemplo, a imagem com nome PSP\_09933\_1005\_BG12\_0.img foi adquirida durante a primeira fase científica de observação, na órbita 9933, centrada na latitude 100,5° (contada a partir do equador, onde *tttt* = 0000), na banda azul/verde, CCD 12, canal número 0. Mais informações podem ser encontradas em [http://hirise.lpl.arizona.edu/pdf/HiRISE\\_EDR\\_SIS\\_2007\\_03\\_15.pdf](http://hirise.lpl.arizona.edu/pdf/HiRISE_EDR_SIS_2007_03_15.pdf), acesso em mai. 2011.

## 2.5 Dust Devils

Segundo Newman (2001) e Ringrose et al. (2007), existem dois processos principais causadores da suspensão de partículas da superfície de Marte: suspensão causada pela força dos ventos próximos à superfície e por vórtices convectivos chamados *dust devils*. O material desprendido pode ser classificado em *areia* ou *poeira*. A areia é formada por partículas com diâmetros de 2 mm a 62,5 µm que se movem aos saltos, são pesadas demais para permanecer suspensas e, portanto, nunca se tornam parte da circulação atmosférica, diferentemente da poeira, formada por partículas com diâmetros menores que 62,5 µm. Tempestades de areia são observadas com certa frequência em Marte e as maiores ocorrem quando é verão no hemisfério sul, podendo se espalhar pelo planeta todo. Newman (2001) comenta ainda que mudanças na distribuição de poeira causam alterações locais na absorção e espalhamento de radiação pela atmosfera. A atmosfera, por sua vez, sofre alterações de temperatura que influenciam a circulação dos ventos e alteram o transporte e espalhamento da poeira pela superfície.

Os citados *dust devils* são vórtices convectivos formados por correntes de ar quente instáveis próximas à superfície, provocadas por insolação e, segundo Lorenz (2010), são os fenômenos dinâmicos mais proeminentes observados na superfície de Marte. O fenômeno é geralmente caracterizado por três regiões específicas: 1) Saia de ejeção: é a parte mais visível do *dust devil*, estendendo-se a vários metros sobre a superfície. Esta região consiste de uma grande quantidade de material da superfície que é suspensa, geralmente com diâmetro maior que 100  $\mu\text{m}$ ; 2) Interior do vórtice: inclui o corpo principal do *dust devil* e geralmente é menos visível que a saia de ejeção devido ao menor carregamento de partículas. Esta região contém pequenas partículas de poeira (0,3-25  $\mu\text{m}$ ) e pode se estender de 100 a 1.000 m sobre a superfície; 3) Pluma térmica: pode alcançar várias centenas de metros sobre o cone. Geralmente carrega poucas partículas e por esta razão é menos visível. A formação de *dust devils* é ilustrada na Figura 54.

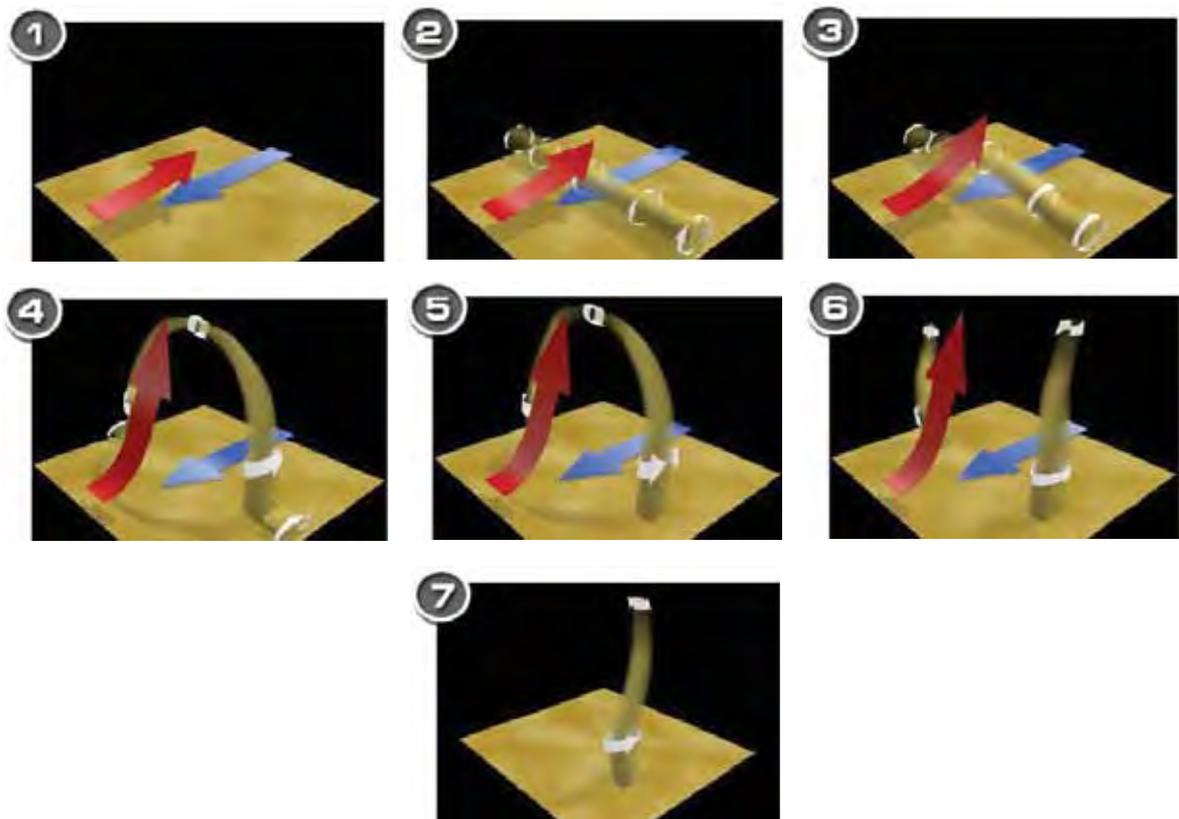


Figura 54: Formação de *dust devils*.

Fonte: Adaptada de RENNÓ et al. (2004).

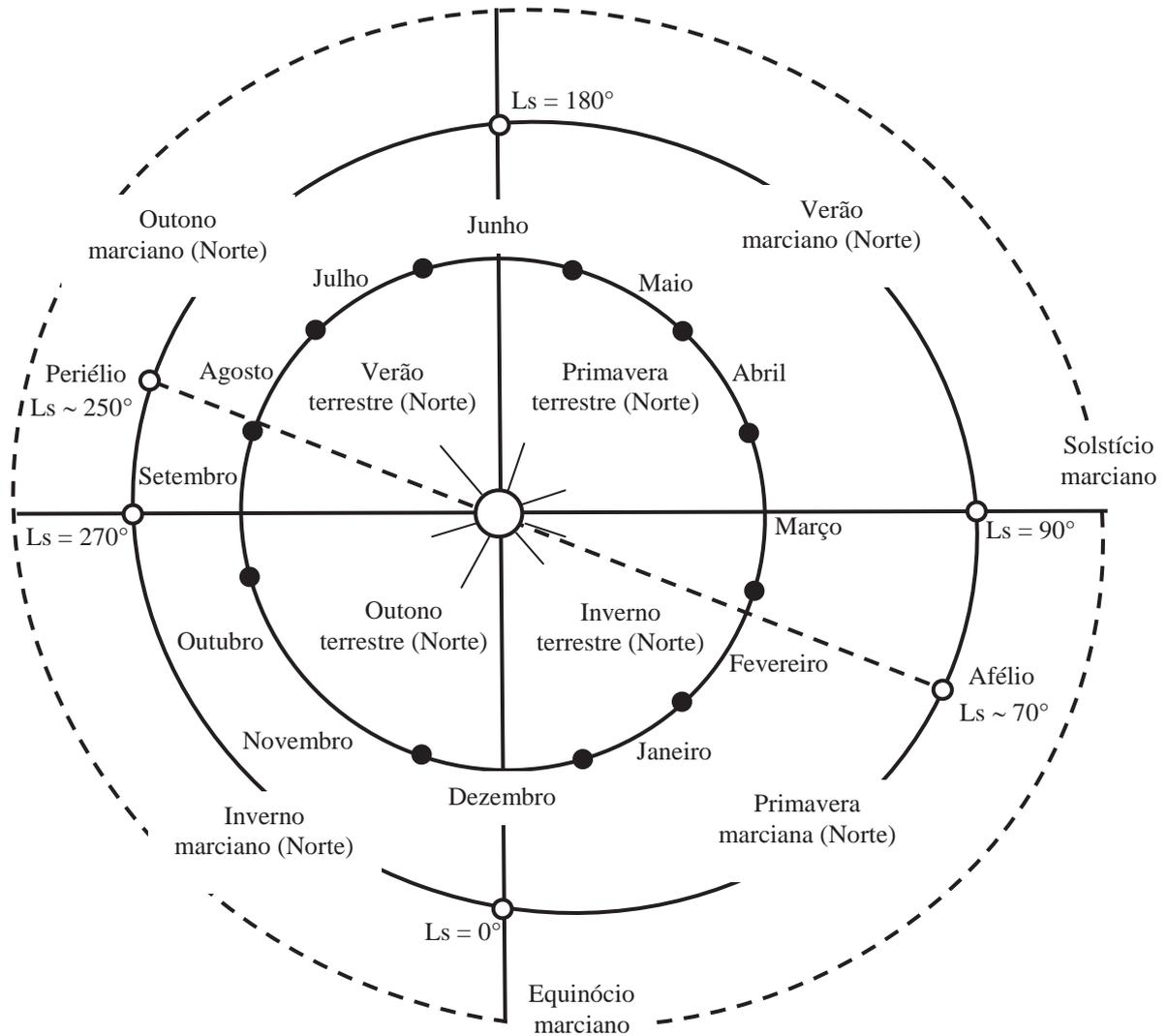
Referindo-se à Figura 54, em (1) há o choque de uma corrente de ar quente (seta vermelha) com outra fria (seta azul), causando um vórtice horizontal (2). O ar quente sobe,

arrastando consigo o túnel de vento (3, 4 e 5) até que este se rompe em duas colunas (6). Um dos vórtices tende a perder força e se desfazer enquanto o outro se torna um *dust devil* (7).

*Dust devils* têm sido estudados na Terra por pelo menos um século (BADDELEY, 1860; IVES, 1947; BROOKS, 1960; TANNER, 1963; SINCLAIR, 1966; IDSO, 1974) e foram observados pela primeira vez em Marte nas imagens orbitais obtidas pelo programa *Viking* (1975) (THOMAS e GIERASCH, 1985). Esses fenômenos, semelhantes a tornados, com velocidades de até  $59 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$  (compatível com a velocidade de um tornado classe F2) (STANZEL et al., 2008), têm dimensão variável chegando a medir quilômetros em diâmetro e altura (informação sobre dimensões de *dust devils* marcianos e também terrestres são apresentadas na Tabela 2), com duração de poucos minutos a horas (REISS, ZANETTI e NEUKUM, 2011). Sua formação ocorre com maior frequência durante a primavera e o verão marcianos, em horário local próximo das 14:00h (STANZEL et al., 2008) e são o principal mecanismo de injeção de poeira na atmosfera (BASU, RICHARDSON e WILSON, 2004; BASU, 2005).

As estações do ano marcianas são definidas em termos de *longitude solar* (Ls), ou seja, a posição de Marte em relação ao sol, medida em graus, a partir do equinócio vernal (início da primavera no hemisfério norte). Assim, a primavera no hemisfério norte e o outono no hemisfério sul começam em  $Ls = 0^\circ$ , o verão no hemisfério norte e o inverno no hemisfério sul começam em  $Ls = 90^\circ$ , o outono no hemisfério norte e a primavera no hemisfério sul começam em  $Ls = 180^\circ$ , e o inverno no hemisfério norte e verão no hemisfério sul começam em  $Ls = 270^\circ$ . A Figura 55 ilustra como são definidas as estações do ano marciano em termos de longitude solar.

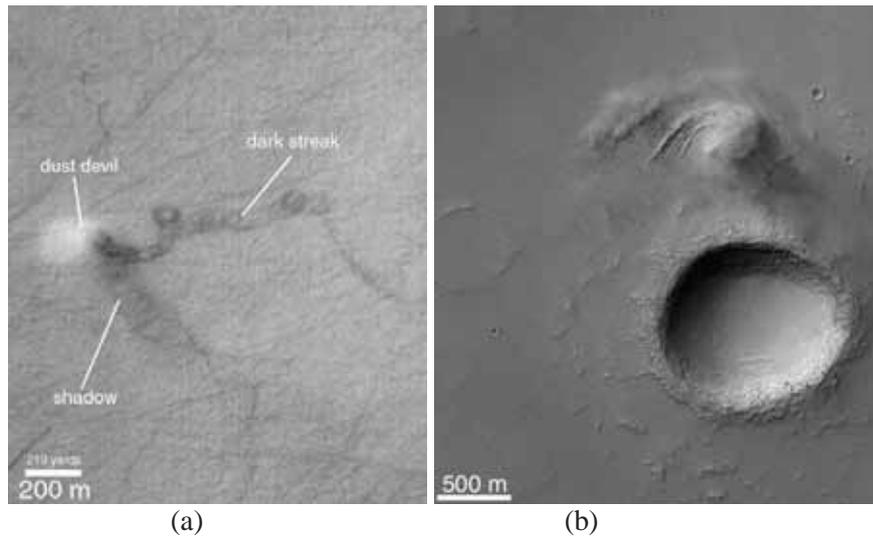
Quanto à distribuição espacial, alguns trabalhos apresentam resultados divergentes: Cantor, Kanak e Edgett (2006) e Stanzel et al. (2008) argumentam que a probabilidade de ocorrência de *dust devils* nos hemisférios norte e sul é a mesma, enquanto Whelley e Greeley (2006, 2008) defendem a tese de que eles ocorrem mais no hemisfério sul. Este hemisfério, por causa da excentricidade da órbita marciana, receberia aproximadamente 40% mais de energia solar no verão. Esta diferença em aquecimento é prevista pelo GCM (HABERLE et al., 1993). Com respeito à elevação do terreno, Malin e Edgett (2001) comentam que a formação dos vórtices independe da altitude. As Figuras 56 e 57 mostram *dust devils* em atividade na Terra e em Marte, respectivamente.



**Figura 55:** Estações do ano marciano definidas em termos de longitude solar  $L_s$ .  
Fonte: Adaptada de CARR (2006).



(a) (b)  
**Figura 56:** *Dust devils* na superfície terrestre: (a) Nevada, EUA; (b) Arizona, EUA.  
Fonte: BALME e GREELEY (2006).



**Figura 57:** Dust devils na superfície marciana: (a) *Promethei Terra*; (b) *Syria*.

Fonte: disponível em: < [http://www.msss.com/msss\\_images/subject/dust\\_devils.html](http://www.msss.com/msss_images/subject/dust_devils.html) >  
 Acesso em: fev. 2010.

Na Figura 57(a) percebe-se o rastro característico deixado pelo *dust devil*. Conforme o vórtice se movimentava, ele espalha os sedimentos mais finos em seu caminho, deixando à mostra uma camada mais rugosa e heterogênea da superfície. Na grande maioria dos casos a refletância desta camada é mais baixa que aquela que a cobria, daí a aparência escura dos rastros.

A Tabela 2 mostra uma comparação entre algumas características físicas observadas em *dust devils* terrestres e marcianos. Os valores observados mais frequentemente, quando existirem, são indicados entre parênteses.

Tabela 2: Características de *dust devils* terrestres e marcianos.

	Diâmetro (m)	Altura (m)	Velocidade tangencial (m/s)	Velocidade vertical (m/s)	Sentido de rotação	Temperatura (K)
<b>Terra</b>	1-150 (5-30)	1-2.400 (250-1.500)	4-20	0,3-15 (4)	Aleatório	2-8 (3-4)
<b>Marte</b>	5-1.750 (250)	≤ 8.000 (2.000-6.000)	2-93	0,1-10,4	Aleatório	0,5-6

Fonte: Adaptada de CANTOR, KANAK e EDGETT (2006).

O conhecimento sobre a atividade de *dust devils* é importante para entender o clima e geologia de Marte, bem como a modificação de sua superfície (BALME, WHELLEY e GREELEY, 2003), e a habilidade de detectá-los na atmosfera marciana a partir de imagens orbitais tem se tornado importante para estudos científicos e também para planejamento de

missões robóticas e tripuladas (YANG, MLSNA e GEISSLER, 2006). Örmö e Komatso (2003) afirmam que circulação de ar é o único fator modelador da superfície atualmente ativo em Marte, em uma escala de tempo geologicamente pequena, e estudos realizados pelos autores mostram que *dust devils* podem ser considerados a maior causa da presença de feições lineares e curvilíneas na superfície daquele planeta. Estes vórtices são os maiores responsáveis por processos de erosão em altas latitudes e sua ação cumulativa durante várias estações espalha poeira da superfície, a qual contribui para a opacidade da atmosfera e para bruscas variações locais e regionais de temperatura. Reiss, Zanetti e Neukum (2010) comentam que vórtices com diâmetros de 300 a 1.000 m podem contribuir localmente com até ~50% da poeira suspensa na atmosfera.

Os rastros deixados por estes fenômenos podem ser usados para inferir a direção da circulação atmosférica no planeta (GEISSLER e ENGA, 2007). Cantor, Malin e Edgett (2002) comentam que *dust devils* terrestres tendem a desviar de direção num ângulo de aproximadamente 45° da direção principal dos ventos, à direita ou à esquerda da direção principal, dependendo do seu sentido de rotação (horário ou anti-horário).

A análise da orientação de rastros de *dust devils* e outras feições oriundas de processos eólicos, como dunas e *ripples*, em algumas regiões do planeta, mostrou que a direção dos ventos nas áreas consideradas segue um padrão SW-NE e NW-SE (ÖRMO e KOMATSO, 2003; FENTON, TOIGO e RICHARDSON, 2005; DRAKE et al., 2006). Este resultado contrastou com as direções previstas pelo Modelo de Circulação Geral da atmosfera marciana (N-S e E-W, segundo Greeley et al. (1992)), dando indícios de que os processos eólicos ativos no planeta precisam ser mais bem estudados.

---

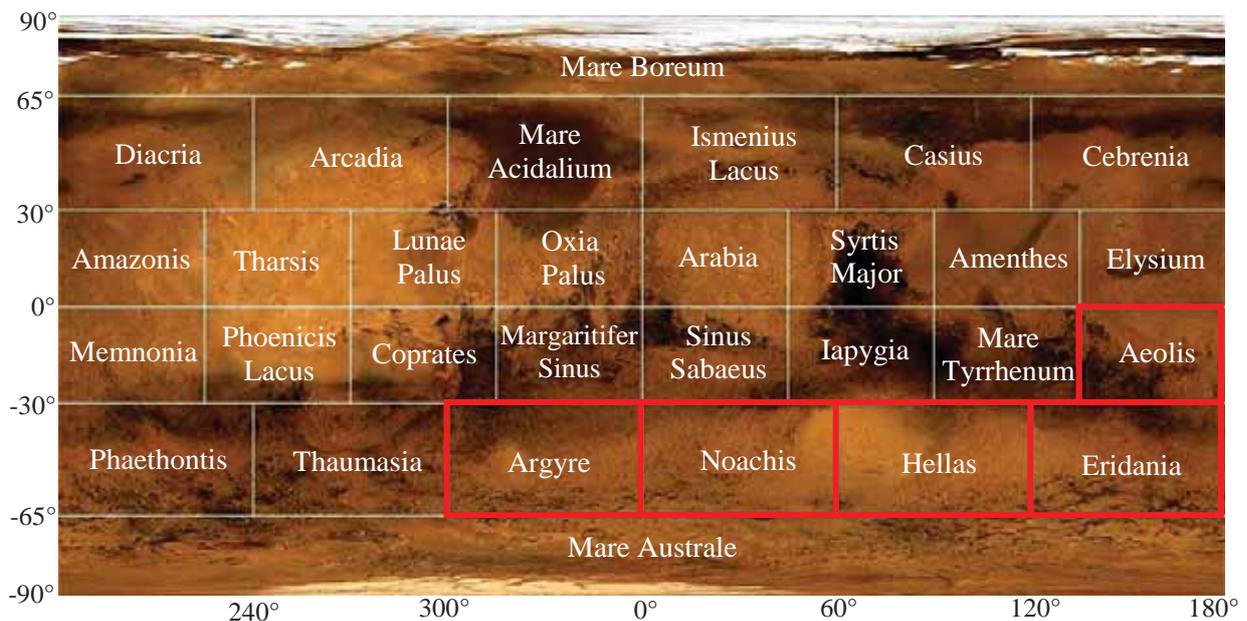
Capítulo 3

**MATERIAIS E MÉTODO**

---

### 3.1 Banco de imagens

A busca por imagens contendo rastros de *dust devils* foi norteada por evidências (BALME et al., 2003; FENTON et al., 2005; ÖRMO e KOMATSU, 2003; WHELLEY e GREELEY, 2008) de que a formação dos vórtices é mais frequente no hemisfério Sul e que a maioria deles ocorre durante a primavera e verão marcianos. Foram consultados os bancos de imagens da empresa *Malin Space Science Systems* (responsável pela câmera MOC) e da Universidade do Arizona (responsável pela câmera HiRISE) em busca de imagens com longitude solar entre 180° e 360° (também foram incluídas no conjunto algumas imagens em que, de acordo com a bibliografia consultada, se observou a presença de rastros, embora não tenham sido tomadas na primavera e verão) nas regiões Aeolis, Argyre, Noachis, Hellas e Eridania, mostradas em realce na Figura 58.



**Figura 58:** Regiões estudadas: Aeolis, Argyre, Noachis, Hellas e Eridania.  
 Fonte: disponível em <[http://www.msss.com/moc\\_gallery/ab1\\_m04/narrowangles.html](http://www.msss.com/moc_gallery/ab1_m04/narrowangles.html)>.  
 Acesso em: fev. 2011.

Cerca de 1.000 imagens foram pesquisadas e rastros foram encontrados em 124 delas: 75 MOC pancromáticas e 49 HiRISE da banda do vermelho. A escolha por imagens MOC pancromáticas foi feita para que se pudesse aproveitar a alta resolução espacial da câmera de abertura angular pequena. No caso da câmera HiRISE, a decisão pelo intervalo

espectral do vermelho se fez por se considerar que neste canal as feições de interesse para a pesquisa destacam-se mais em relação às outras feições que nos demais canais.

A resposta espectral dos rastros varia significativamente de cena para cena, bem como a topografia das regiões. Nas 124 imagens está representada, tanto quanto possível, a grande variação de brilho dos rastros.

A fim de diminuir o tempo de processamento (especialmente por causa do tamanho das imagens HiRISE) e descartar informação irrelevante (como grandes áreas sem rastros ou qualquer outra feição geomorfológica) as imagens foram recortadas em regiões de interesse, formando um banco com 200 imagens (90 MOC e 110 HiRISE), distribuídas da seguinte maneira: 4 MOC e 1 HiRISE na região de Aeolis, 16 MOC e 55 HiRISE na região de Argyre, 20 MOC e 19 HiRISE na região de Noachis, 24 MOC e 16 HiRISE na região de Hellas e 25 MOC e 20 HiRISE na região de Eridania. A resolução espacial das imagens HiRISE é de 0,25 m ou 0,50 m com predominância para 0,25 m (~90% das imagens). A resolução das imagens MOC variou de 1,43 m à 8,75 m com média de  $4,70 \text{ m} \pm 1,44 \text{ m}$ . A Tabela 3 resume algumas características das imagens selecionadas.

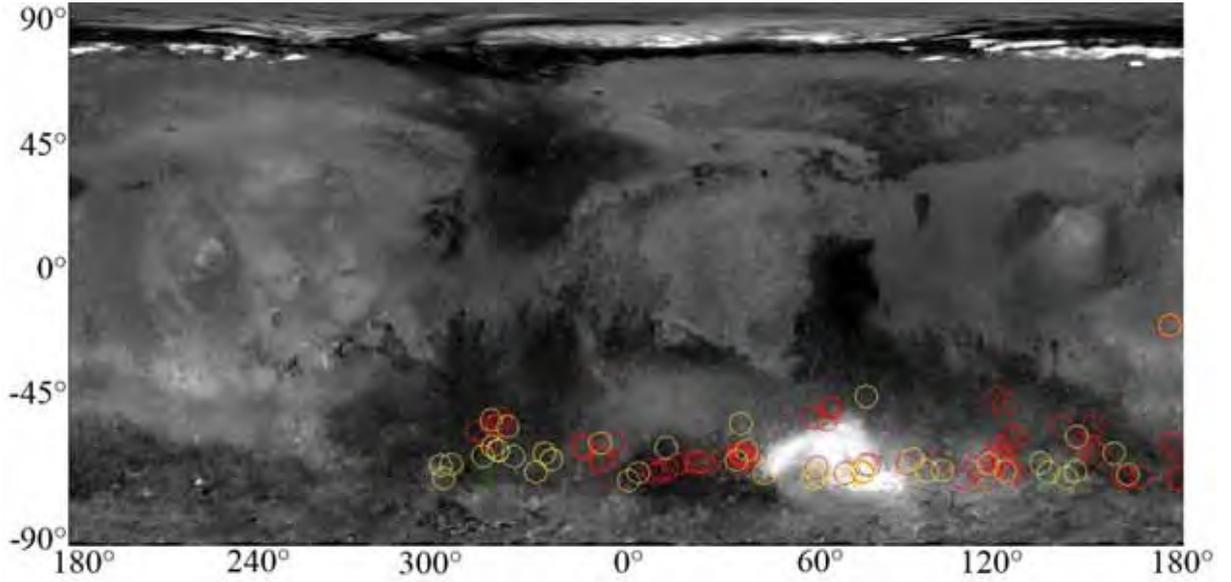
Tabela 3: Características do conjunto de imagens.

	Lat (°)	Lon (°)	Ls (°)	Hora local	Largura (pixels)	Altura (pixels)
<b>Mín.</b>	-64,80	0,70	11,22	13:22:00	138	179
<b>Méd.</b>	-53,39	156,06	285,29	14:21:16	2.755	2.457
<b>Desvio</b>	11,31	116,60	59,94	00:31:29	2.445	1.846
<b>Máx.</b>	-14,47	358,80	353,90	16:00:00	9.058	7.526

A Figura 59 mostra a distribuição do conjunto inicial de 124 imagens na superfície de Marte de acordo com as coordenadas planetocêntricas do centro de cada cena. Círculos amarelos e vermelhos indicam, respectivamente, imagens HiRISE e MOC.

Um banco de dados foi criado para armazenar as seguintes informações sobre cada imagem: *Nome*, *Data de aquisição*, *Hora*, *Sensor*, *Largura*, *Comprimento*, *Resolução horizontal* ( $R_h$ ), *Razão de aspecto* ( $R_a$ ), *Banda*, *Longitude*, *Latitude*, *Longitude solar* ( $L_s$ ), *Sistema de projeção* e *Nome da região*. Estas informações sobre o conjunto de 200 imagens são apresentadas no Apêndice.

A razão de aspecto  $R_a$  é a relação entre as resoluções vertical  $R_v$  e horizontal  $R_h$  ( $R_a = R_v / R_h$ ). A resolução espacial das imagens HiRISE é a mesma nas duas direções e, portanto, a razão de aspecto para este sensor é sempre igual a 1 (um). No caso das imagens MOC as resoluções variam de cena para cena.



**Figura 59:** Distribuição das imagens na superfície de Marte: círculos amarelos e vermelhos marcam as posições das imagens MOC e HiRISE, respectivamente.

Fonte: NASA/JPL/MSSS.

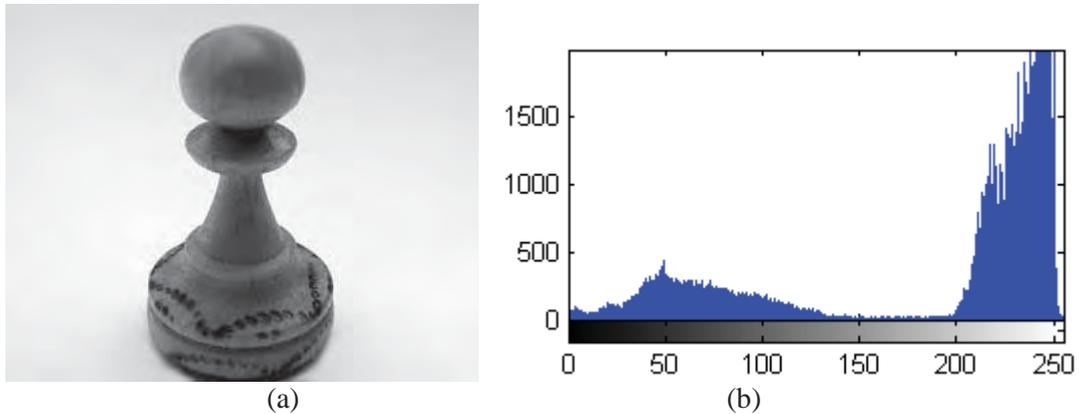
As imagens HiRISE foram georreferenciadas no sistema planetocêntrico, com longitudes positivas a Leste e latitudes planetocêntricas enquanto as imagens MOC foram georreferenciadas no sistema planetográfico, com longitudes positivas a Oeste e latitudes planetográficas (capítulo 2, seção 2.3.1). Estas informações tiveram que ser compatibilizadas antes de serem inseridas no banco de dados. O sistema de referência adotado como padrão foi o planetocêntrico, como recomendado pela União Astronômica Internacional. As coordenadas das imagens MOC foram então convertidas para o sistema de referência das imagens HiRISE. As longitudes positivas a Leste são complementares às longitudes positivas a Oeste e as latitudes planetocêntricas  $\varphi$  se relacionam com as planetográficas  $\varphi'$  da seguinte maneira:

$$\tan \varphi = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \tan \varphi' \quad (71)$$

### 3.2 Fundamentação do método

O método elaborado para detecção automática dos rastros de *dust devils* baseia-se em duas idéias principais: simplificação da cena, de maneira a se obter imagens com histogramas aproximadamente bimodais e com os rastros realçados; e utilização de um

número mínimo de transformações. A Figura 60(a) exibe uma imagem bastante simples, na qual os pixels do objeto contrastam de maneira significativa com os pixels de fundo. O histograma da imagem, em (b), apresenta duas modas bem destacadas.

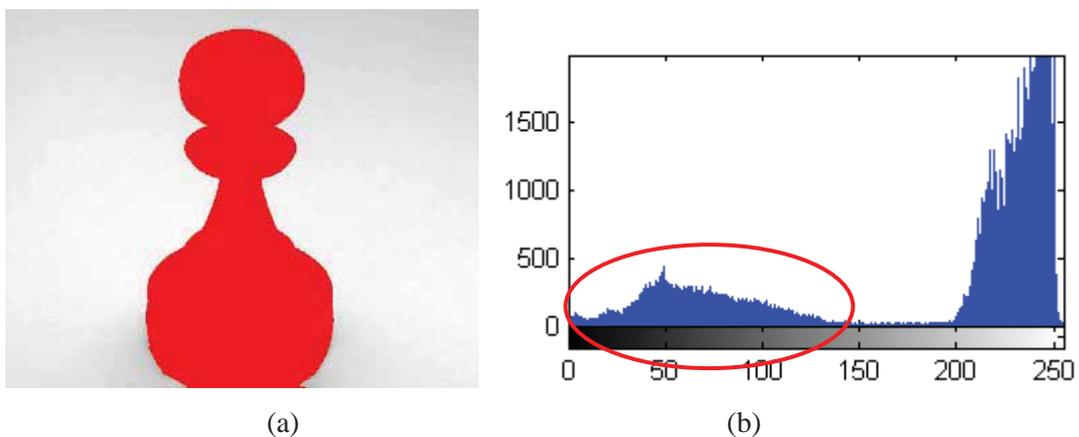


**Figura 60:** Imagem cujos pixels relevantes e de fundo apresentam grande contraste (a) e seu histograma bimodal (b).

Fonte: disponível em: < [http://www.diaadia.pr.gov.br/tvpendrive/arquivos/File/imagens/3educacao\\_fisica/1xadrez10.jpg](http://www.diaadia.pr.gov.br/tvpendrive/arquivos/File/imagens/3educacao_fisica/1xadrez10.jpg) >

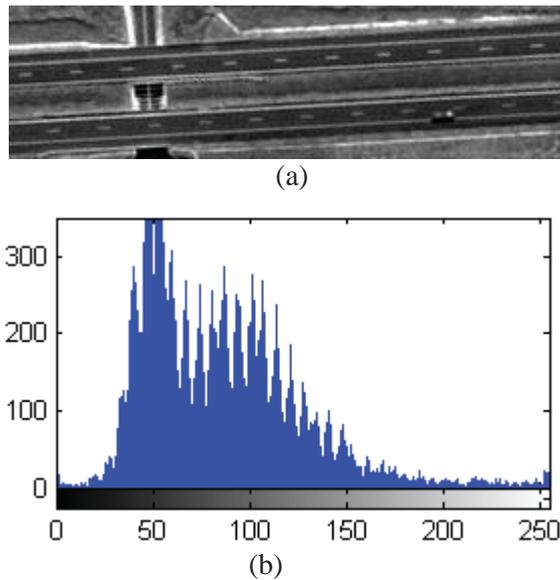
Acesso em: fev. 2010.

Imagens com características semelhantes às da Figura 60 são típicas de processos de controle de qualidade de objetos industriais, tomadas em ambientes controlados, em que não se tem uma forte influência da função de iluminação (ver equação 2) nem outros alvos compondo a cena. Nestes casos a segmentação do objeto é facilmente conseguida por algum método de binarização automática, como é visto na Figura 61.



**Figura 61:** Imagem binarizada sobreposta à imagem original (a) e pixels relevantes indicados pela elipse em vermelho em (b).

Porém, o mesmo não acontece com a grande maioria de imagens de sensoriamento remoto orbital, conforme mostra a Figura 62 (imagem QuickBird pancromática, realçada pelo estiramento de histograma). Nelas, a função de iluminação desempenha papel fundamental para o sucesso, ou não, da segmentação, conforme discutido na seção 2.2.1.

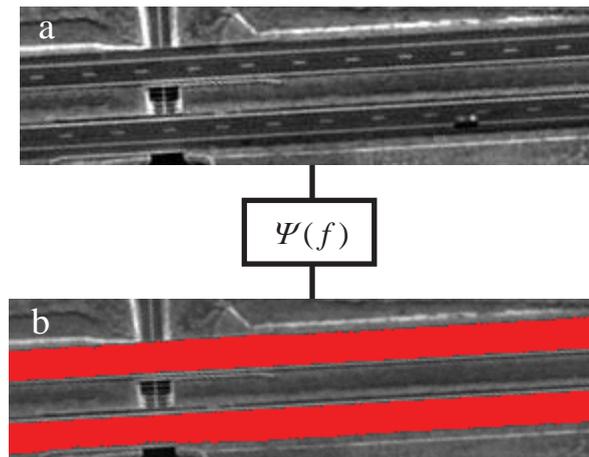


**Figura 62:** Imagem pancromática QuickBird (a) e seu histograma (b).

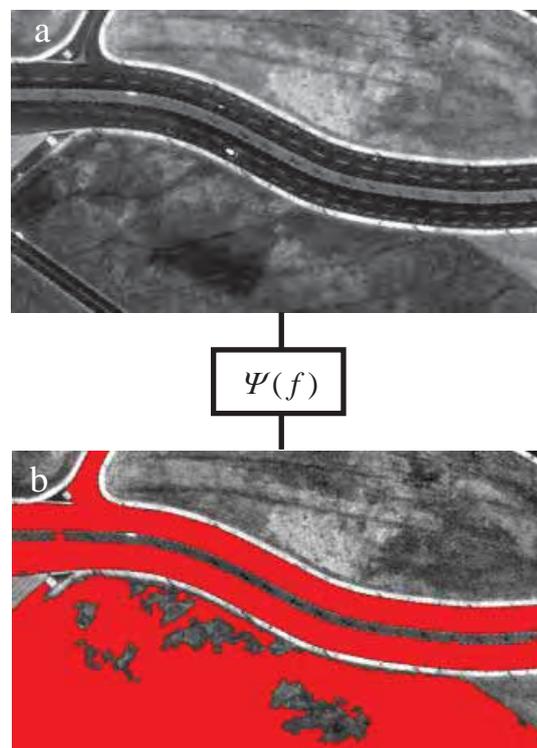
De acordo com a equação 2, uma cena pode ser entendida como o produto das funções de reflectância e iluminação. Uma simplificação importante para o sucesso na segmentação das imagens de sensoriamento remoto é a eliminação do gradiente de iluminação na tentativa de se obter um histograma aproximadamente bimodal. Este gradiente pode ser obtido com ajuda de filtros morfológicos, conforme ilustrado nas Figuras 17 e 19 da seção 2.2.2. Nas imagens MOC e HiRISE, e para a finalidade de detectar rastros de *dust devils*, o gradiente de iluminação pode ser considerado como sendo responsável por grandes áreas aproximadamente homogêneas e com alguma variação geomorfológica sobre as quais os rastros se formaram.

Outro aspecto a se considerar é a quantidade de transformações a que as imagens serão submetidas. Os operadores de MM requerem parâmetros como tamanho, geometria e orientação de EEs, quantidade de interações em processos não idempotentes, imagens de marcadores, etc. Quanto maior o número de transformações, maior será a dificuldade em se definir um método que seja de abrangência geral e automático para detecção dos alvos. Como

exemplo, a Figura 63(a) foi processada para detecção das pistas da rodovia presente na cena e o resultado é exibido em (b). Nesta,  $\Psi(f)$  representa uma sequência de nove transformações. Ao se aplicar a mesma sequência a outro recorte da *mesma* cena (portanto, com as mesmas condições de iluminação) para detectar o *mesmo* tipo de alvo, com características radiométricas semelhantes, a rotina falha (Figura 64).



**Figura 63:** Detecção de pistas da rodovia.



**Figura 64:** Falha no método de detecção.

Isto acontece porque os parâmetros utilizados nas duas situações foram os mesmos. Estes parâmetros devem variar de cena para cena de acordo com as características geométricas e radiométricas de cada uma delas e também dos alvos de interesse. Ao se trabalhar com um número reduzido de transformações a tarefa de se determinar automaticamente parâmetros de transformação para cada imagem é facilitada.

### 3.3 Descrição do método

Em linhas gerais, o método desenvolvido para detectar automaticamente rastros de *dust devils* em imagens orbitais é apresentado na Figura 65.



Figura 65: Etapas do método de detecção automática de rastros de *dust devils*.

As etapas consistem em: *Filtragem*, *Seleção de candidatos a rastro*, *Recuperação dos rastros*, *Detecção dos rastros* e *Análise*. A primeira etapa é uma filtragem com abertura e fechamento por área. Note-se que, muito embora as outras etapas também se constituam de filtrações (com exceção, é claro, da etapa de detecção), a etapa inicial foi nomeada desta maneira para que se faça a distinção entre o que está sendo filtrado nela e nas demais etapas. Na etapa inicial a abertura por área tem o objetivo de atenuar a alta reflectância de dunas, *ripples* e rochas isoladas, enquanto o fechamento por área atenua pontos escuros causados principalmente por sombras de rochas isoladas. Além disso, ruídos possivelmente presentes nas cenas e causados pelo processo de imageamento são eliminados.

O tamanho  $\lambda$  da área considerado na abertura/fechamento por área varia com a resolução espacial  $Rh$  das imagens. Para a abertura foi estabelecida a relação  $\lambda = 500 / Rh$  e para o fechamento a área filtrada consiste em  $\lambda / 2$ . O fator 500 foi escolhido empiricamente a partir de experimentos com imagens dos dois sensores.

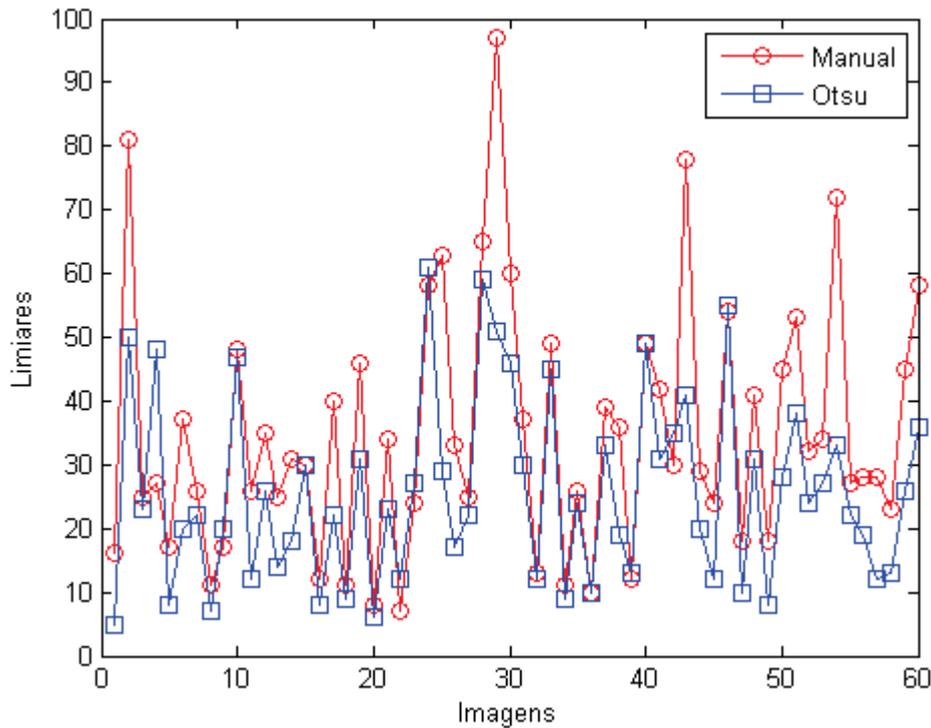
Na segunda etapa do método um fechamento por caminho é aplicado para selecionar todos caminhos escuros. A seleção é feita, portanto, de uma maneira indireta já que todos os rastros são filtrados nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ . O comprimento máximo dos caminhos considerados no fechamento é definido pela dimensão da imagem e obtido por  $(m^2 + n^2)^{1/2} \times 2$ , em que  $m$  e  $n$  são, respectivamente, o número de colunas e linhas da imagem (embora o fechamento por caminho utilizado seja o restrito, definido por Hendriks (2010), os caminhos ainda são flexíveis o bastante para zigzaguear um pouco, portanto o maior caminho possível no pior dos casos terá o comprimento do dobro da diagonal da imagem).

Na terceira etapa os rastros são recuperados e realçados pelo *top-hat*. Na etapa seguinte uma binarização automática pelo método de Otsu é aplicada para detectar os rastros. A saída do processo é, portanto, uma imagem binária com rastros em branco. Finalmente, a análise quantitativa dos resultados é feita para apurar a acurácia do método. Nesta etapa as imagens processadas são comparadas com imagens de *referência* (ou *ground truth*) feitas manualmente.

### **3.4 Refinamento do método**

Após o *top-hat*, a imagem em tons de cinza precisa ser binarizada de maneira que a cena final contenha apenas rastros. Uma vez que a reflectância dos rastros varia de cena para cena uma abordagem automática para definir o valor  $t$  ideal de binarização (aquele que melhor diferencia os rastros das demais estruturas da imagem) deve ser aplicado. Um dos métodos mais bem sucedidos para binarização automática de imagens com base no histograma é o método de Otsu (1979). É um algoritmo simples e rápido, mas apresenta alguns inconvenientes: se a distribuição de níveis de cinza não for bimodal ou se o peso das duas classes, no caso de ser bimodal, for muito desigual a binarização pode não ser bem sucedida. As imagens resultantes do *top-hat* nem sempre apresentam um histograma perfeitamente bimodal e com classes de mesmo peso. Para analisar o desempenho do algoritmo de Otsu na binarização das imagens MOC e HiRISE realçadas por *top-hat* foram utilizadas 60 cenas. Elas foram binarizadas pelo método de Otsu e também manualmente. A Figura 66 mostra uma comparação entre os limiares definidos por Otsu e manualmente. Na

maior parte do tempo (~70% dos testes) o limiar definido pelo método de Otsu é menor que aquele definido manualmente e assumido como *ideal*.



**Figura 66:** Comparação entre os limiares de binarização definidos por Otsu e manualmente.

Além disso, o limiar ideal ficou acima da média dos valores de brilho do histograma em ~98% dos casos. Com base nesta análise a região do histograma em que o algoritmo de Otsu busca o limiar para binarização foi restringida ao intervalo  $[k_{méd}, k_{máx}]$  de valores de brilho.

O conjunto  $M$  de limiares definidos manualmente (considerados ideais, portanto) foi comparado com o método de Otsu nas seguintes situações: algoritmo de Otsu sem restrições ( $O_1$ ); algoritmo de Otsu restrito ao intervalo  $[k_{méd}, k_{máx}]$  ( $O_2$ ); e algoritmo de Otsu restrito ao intervalo  $[k_{méd}, k_{máx}]$  do *Laplaciano* das imagens ( $O_3$ ).

As Figuras 67, 68 e 69 mostram que há uma relação linear (CHATTERJEE e HADI, 2006) entre o conjunto  $M$  de limiares definidos manualmente e os calculados nas situações  $O_i (i=1, \dots, 3)$ . Os coeficientes de correlação  $Cor(M, O_i)$  foram calculados e resultaram em  $Cor(M, O_1) = 81,46\%$ ,  $Cor(M, O_2) = 88,71\%$  e  $Cor(M, O_3) = 88,88\%$ . Uma vez que  $Cor(M, O_2) \sim Cor(M, O_3)$ ,  $O_2$  foi escolhido por ser mais simples e rápido de ser

calculado. A Figura 70 ilustra a melhoria no desempenho da binarização das imagens ao utilizar o método de Otsu restrito.

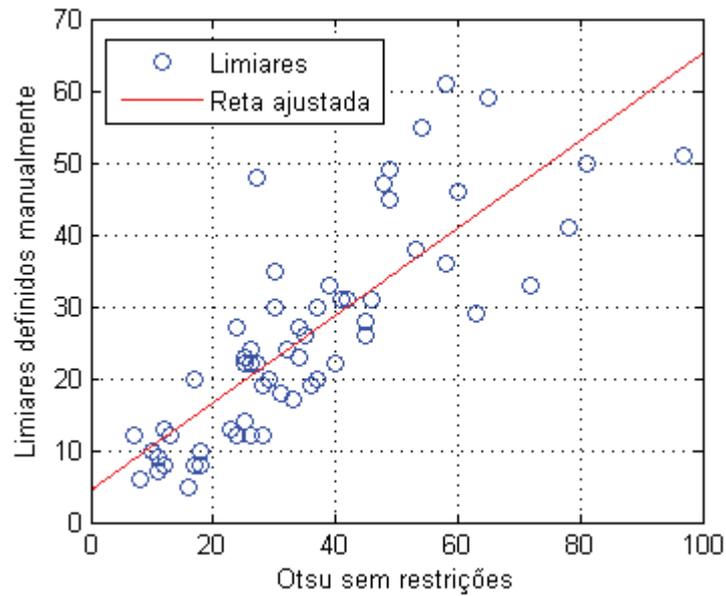


Figura 67: Limiaries manuais versus calculados por Otsu.

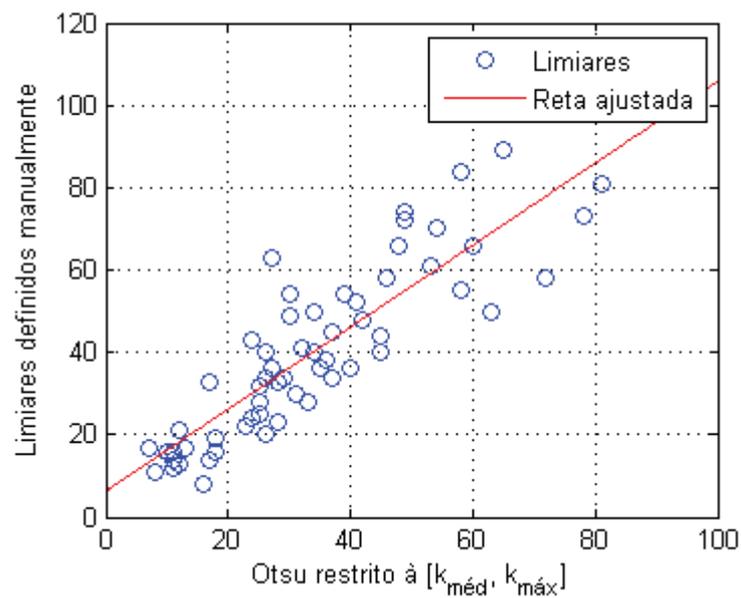
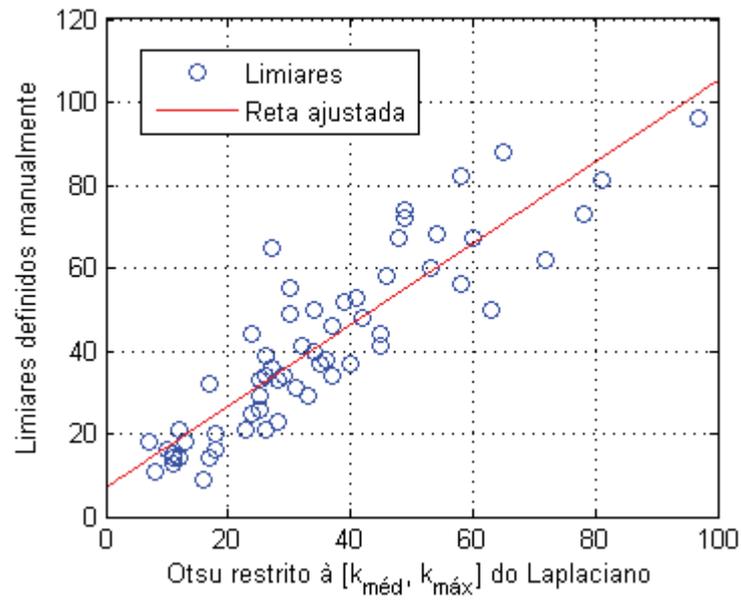
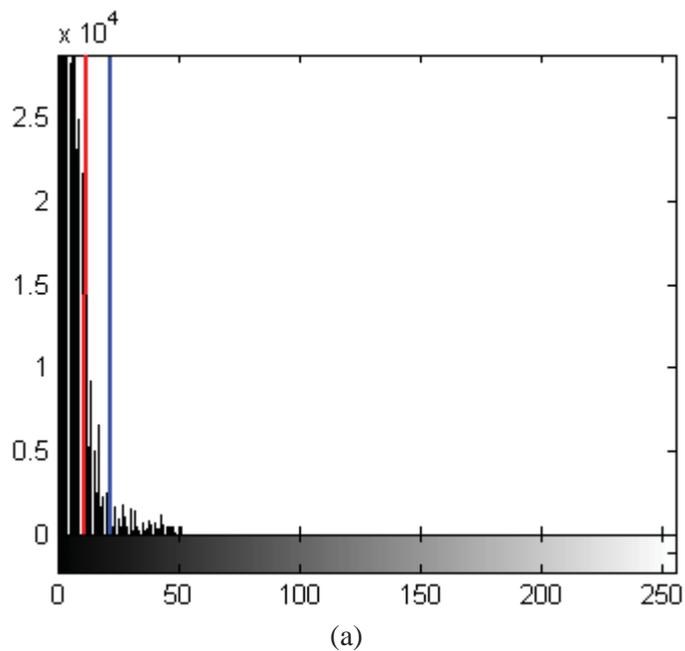


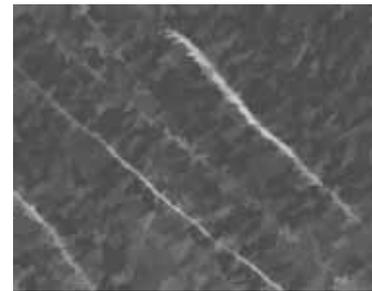
Figura 68: Limiaries manuais versus calculados por Otsu restrito a  $[k_{méd}, k_{máx}]$ .



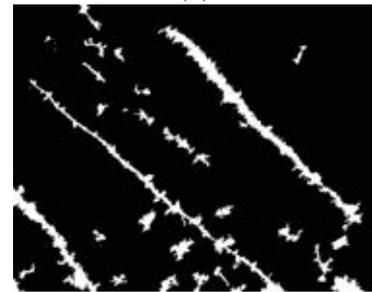
**Figura 69:** Limiars manuais versus calculados por Otsu restrito a  $[k_{méd}, k_{máx}]$  do Laplaciano.



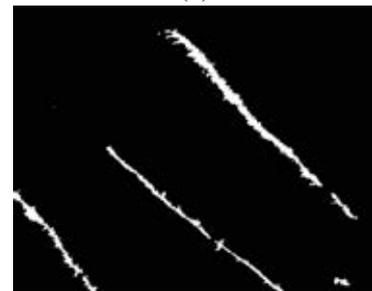
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 70:** Exemplo de melhoria no desempenho da binarização.

A Figura 70(a) mostra o histograma da imagem PSP\_006176\_1225 a ser binarizada (b). O limiar calculado por Otsu foi 13 (assinalado pela linha vermelha no histograma) e o calculado pelo método restrito foi 21 (assinalado pela linha azul no histograma), coincidente com o valor definido manualmente. As Figuras 70(c) e (d) mostram, respectivamente, as binarizações com o limiar definido por Otsu sem restrições e por Otsu restrito. A restrição no espaço de busca do limiar faz com que os rastros sejam detectados com uma menor ocorrência de falsos positivos, o que é importante, especialmente, quando se pretende usar o resultado da detecção para inferir informações sobre os *dust devils*.

---

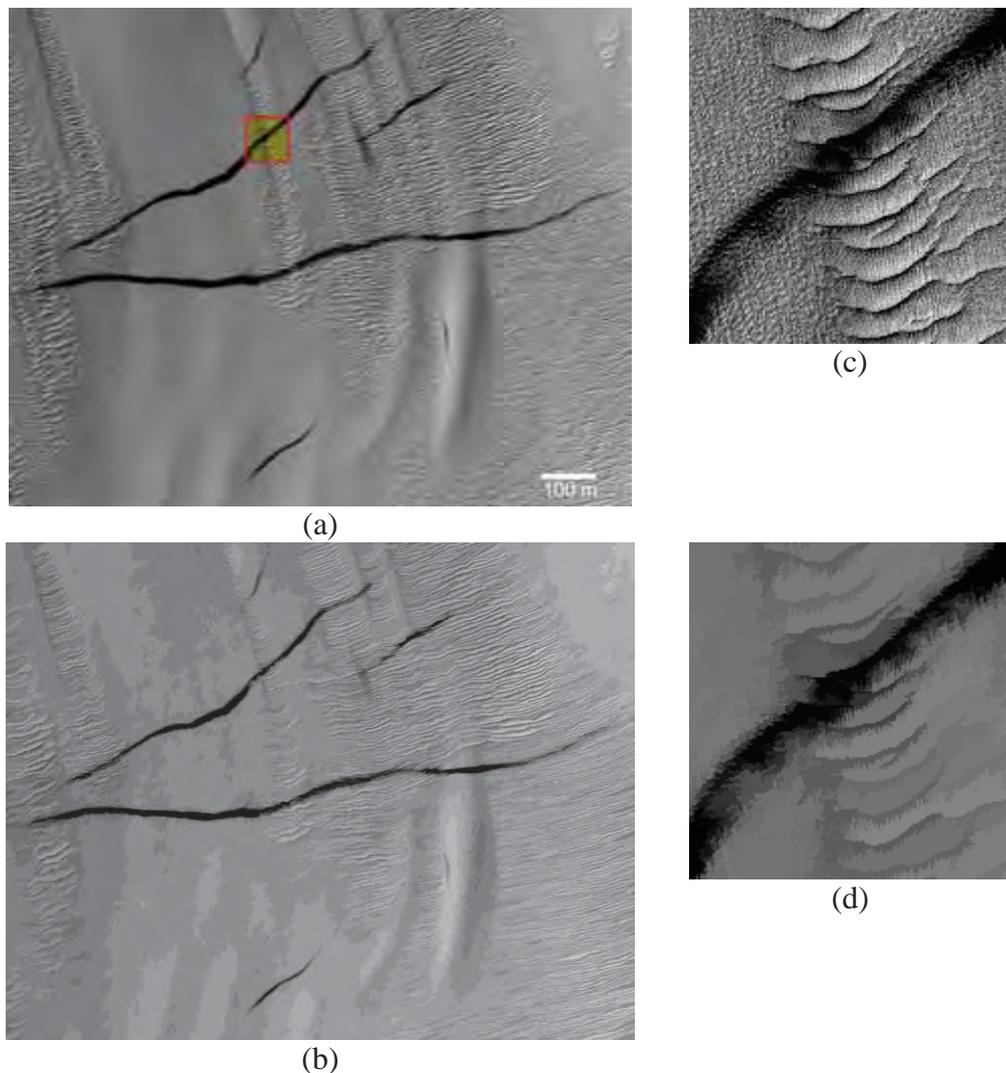
Capítulo 4

**RESULTADOS**

---

#### 4.1 Processamento das imagens para detecção dos rastros

Conforme o fluxograma apresentado na Figura 65, a etapa inicial do método foi uma filtragem preliminar das cenas para eliminação de ruídos oriundos do processo de imageamento, eliminação de sombras causadas por rochas e também atenuação da resposta espectral de alvos muito claros, como dunas. A Figura 71 mostra o resultado da filtragem aplicada na imagem HiRISE PSP\_006163\_1345D. Além de atenuar as faces iluminadas de dunas e pequenas ondulações de areia (*ripples*) as regiões escuras correspondentes aos rastros foram realçadas e compactadas, conforme o detalhe em (d).

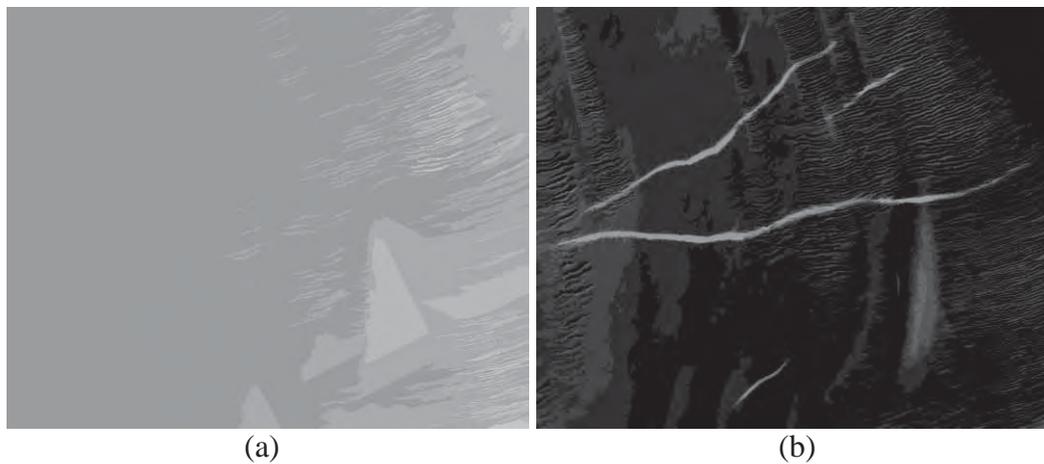


**Figura 71:** Filtragem: (a) imagem original; (b) imagem filtrada; (c, d) detalhes de (a) e (b). O retângulo assinalado em (a) indica a região selecionada para ser vista em detalhe em (c, d).

Fonte: NASA/JPL/University of Arizona.

A mesma imagem, que pertence à região de Argyre, será usada para ilustrar as demais etapas do método. Ela tem 5.531 pixels de altura e 6.863 pixels de largura, 0,25 m de resolução espacial, foi adquirida em 19/11/2007 às 14:28h (hora local marciana) na longitude solar 349,8° e tem como coordenadas 45,3° S de latitude e 316,3° E de longitude.

Na segunda etapa do método o fechamento por caminho é aplicado para selecionar (de maneira indireta, já que o fechamento suprime os rastros) todos os rastros escuros nas direções principais 0°, 45°, 90° e 135°. O resultado, mostrado na Figura 72(a), é uma imagem homogênea, em que a tonalidade de fundo (considerado aqui como sendo tudo aquilo que não é rastro) predomina.

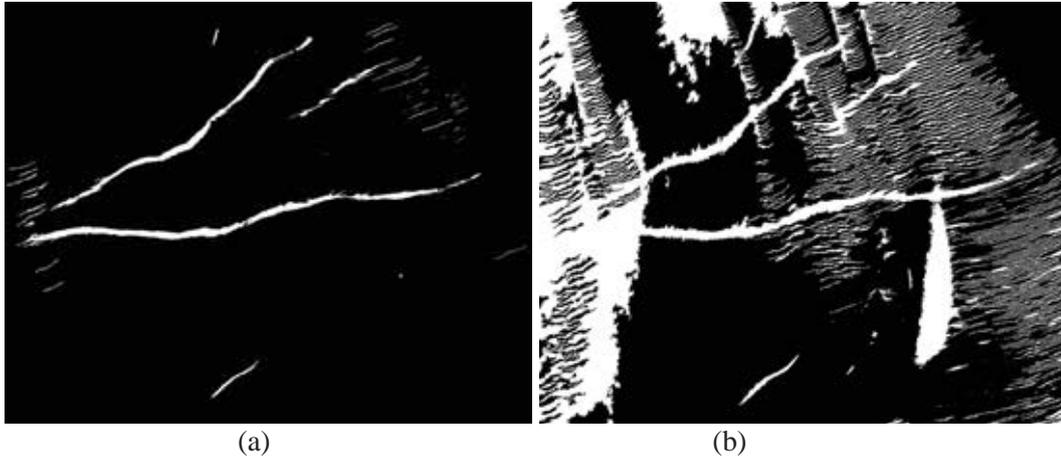


**Figura 72:** Fechamento por caminho (a) e *top-hat* (b).

Os rastros são recuperados na etapa seguinte pela aplicação de *top-hat*. O resultado é mostrado na Figura 72(b) em que as feições de interesse encontram-se bastante realçadas em relação ao restante da cena. A influência do fundo, assumido como função de iluminação, foi bastante atenuada.

Posteriormente, na binarização da imagem para detecção dos rastros, é aplicado o método de Otsu restrito (Figura 73(a)), conforme discussão feita no capítulo 3. A título de comparação, o método sem restrição também é mostrado em (b). No resultado praticamente não há falsos negativos. Algumas sombras causadas por *ripples* são detectadas como rastros mas é clara a maior eficácia do Otsu restrito em relação ao método clássico. Apesar dos falsos positivos a acurácia global da detecção foi de ~99%. A maneira como essa acurácia é calculada será abordada em detalhes na seção 4.2. Do ponto de vista quantitativo, para ratificar o método de Otsu restrito como sendo aquele de maior eficácia, um conjunto de 34 imagens (18 MOC e 16 HiRISE) foi binarizado com o método clássico e com o método

restrito ao intervalo  $[k_{méd}, k_{máx}]$ . A acurácia global com o método clássico foi de  $90,50\% \pm 10,18\%$  e com o restrito foi de  $92,03\% \pm 5,76\%$ . Além do aumento de  $\sim 1,50\%$  em acurácia o desvio padrão foi significativamente reduzido em  $\sim 4,50\%$ , tornando o método mais robusto.

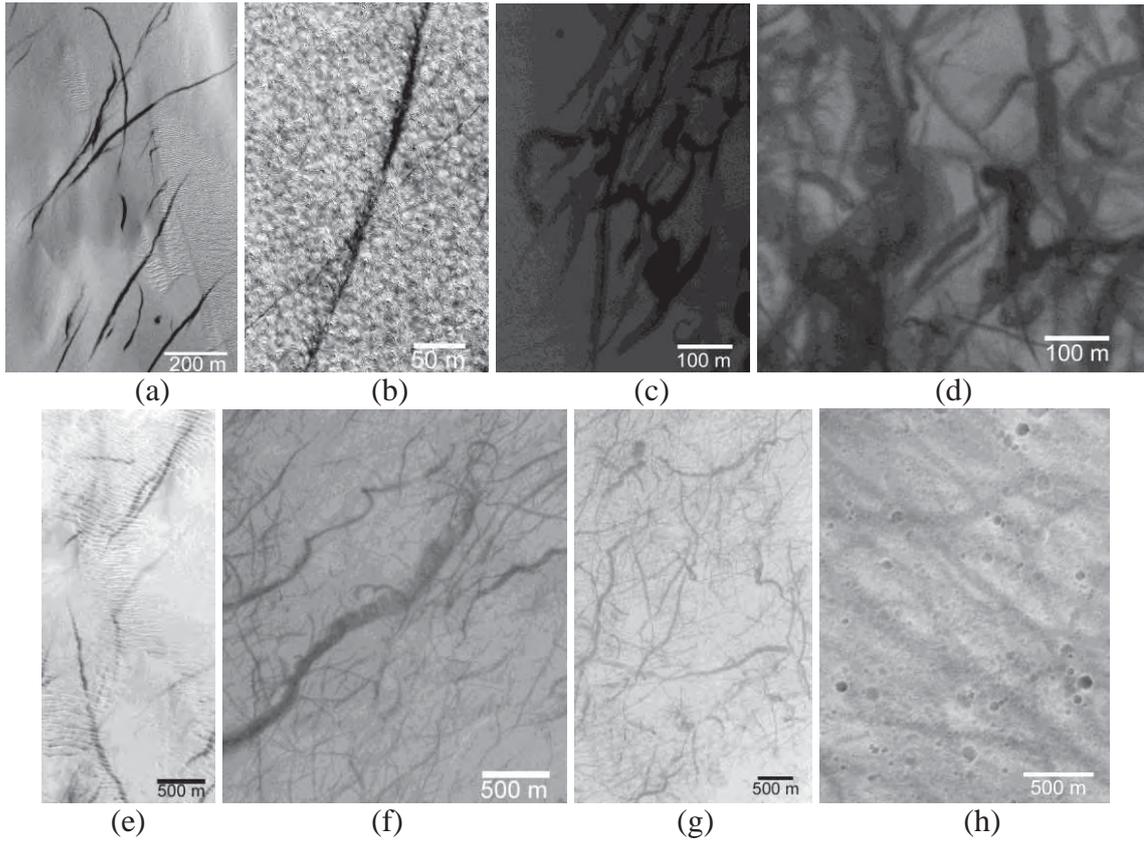


**Figura 73:** Binarização: método de Otsu restrito (a) e sem restrição (b).

O método foi aplicado às 200 cenas do banco de imagens. Em seguida, apresentam-se alguns exemplos que mostram a robustez do método, bem como outros aspectos, em muito menor quantidade, em que o método não funciona corretamente. O resultado da detecção para as imagens HiRISE PSP\_006163\_1345B, PSP\_005780\_1215, PSP\_002548\_1255A e PSP\_004249\_1255 (Figura 74(a-d)) é mostrado na Figura 74(a-d). E o resultado da detecção nas imagens MOC M10-01206, E11-00582, E10-04027 e R13-01467 (Figura 74(e-h)) é mostrado na Figura 74(e-h). Informações sobre as imagens são dadas na Tabela 4.

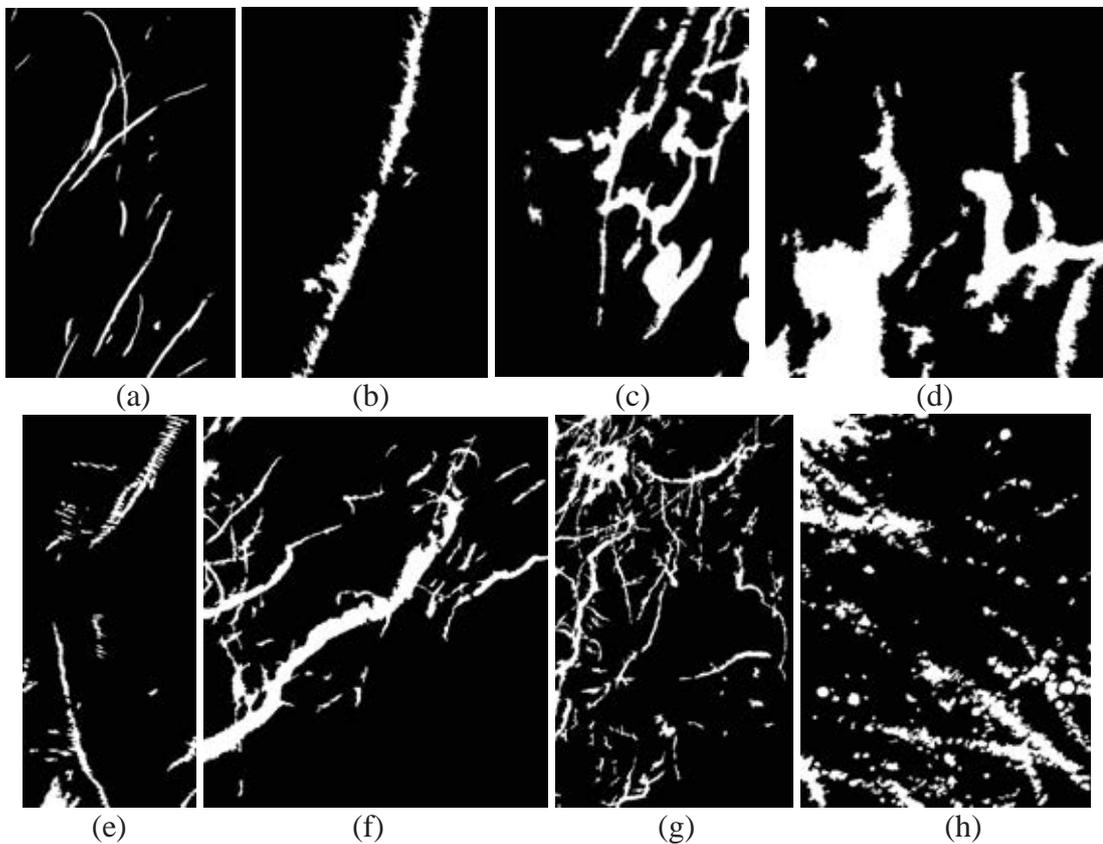
Tabela 4: Sumário de informações sobre as imagens mostradas na Figura 74. As letras (a-h) no campo “Nome” correspondem às imagens exibidas na Figura 74.

Nome	Sensor	Data	Resolução (m)	Dimensão (pixels)	Região
PSP_006163_1345B(a)	HiRISE	19/11/07	0,25	4.415x7.184	Argyre
PSP_005780_1215(b)	HiRISE	20/10/07	0,25	2.168x1.423	Argyre
PSP_002548_1255A(c)	HiRISE	10/02/07	0,25	4.069x2.779	Noachis
PSP_004249_1255(d)	HiRISE	23/06/07	0,25	3.616x3.448	Noachis
M10-01206(e)	MOC	11/12/99	5,55	363x829	Argyre
E11-00582(f)	MOC	04/12/01	5,81	512x590	Noachis
E10-04027(g)	MOC	25/11/01	4,53	672x1.118	Eridania
R13-01467(h)	MOC	10/01/04	1,43	2.077x2.855	Aeolis



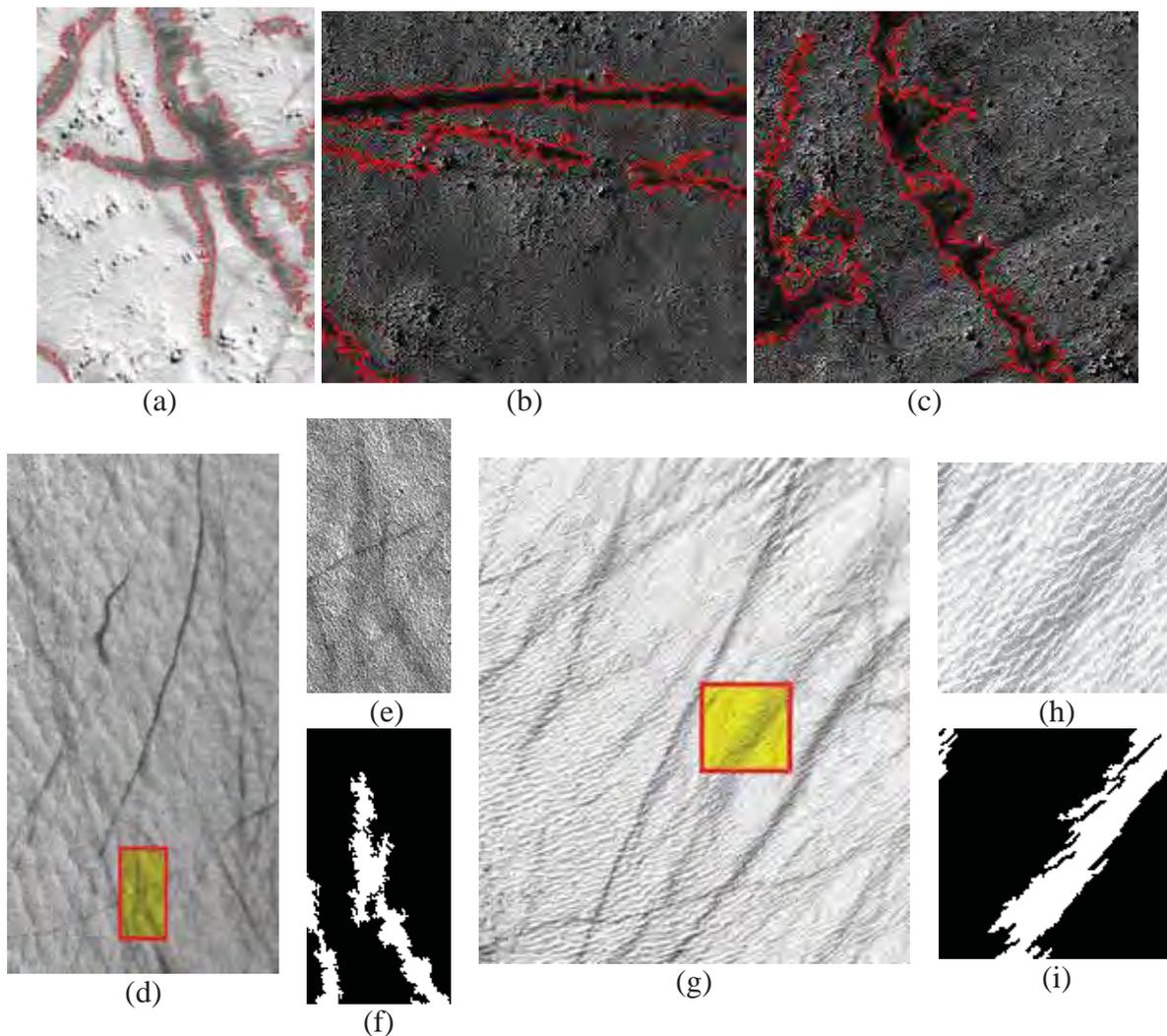
**Figura 74:** Imagens HiRISE e MOC relacionadas na Tabela 4.

Fonte: NASA/JPL/University of Arizona (HiRISE) e NASA/JPL/MSSS (MOC).



**Figura 75:** Detecção de rastros nas imagens mostradas na Figura 75.

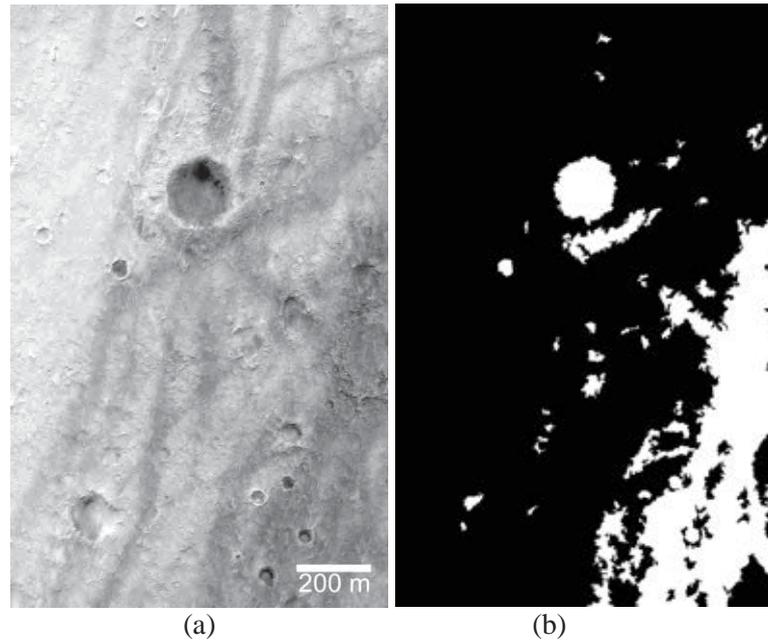
O bom desempenho do método pode ser avaliado visualmente nos detalhes mostrados na Figura 76. Em (a-c) o algoritmo teve sucesso na detecção dos rastros mesmo na presença de blocos de rocha e suas sombras projetadas (bordas dos rastros detectados em vermelho). Na Figura 76(d-i) rastros com bordas bastante suaves e pouco definidas não provocam falhas na detecção. Isso pode ser facilmente notado ao se analisar os detalhes (assinalados por retângulos) das imagens mostradas em (d) e (g), exibidos em (e, f) e (h, i).



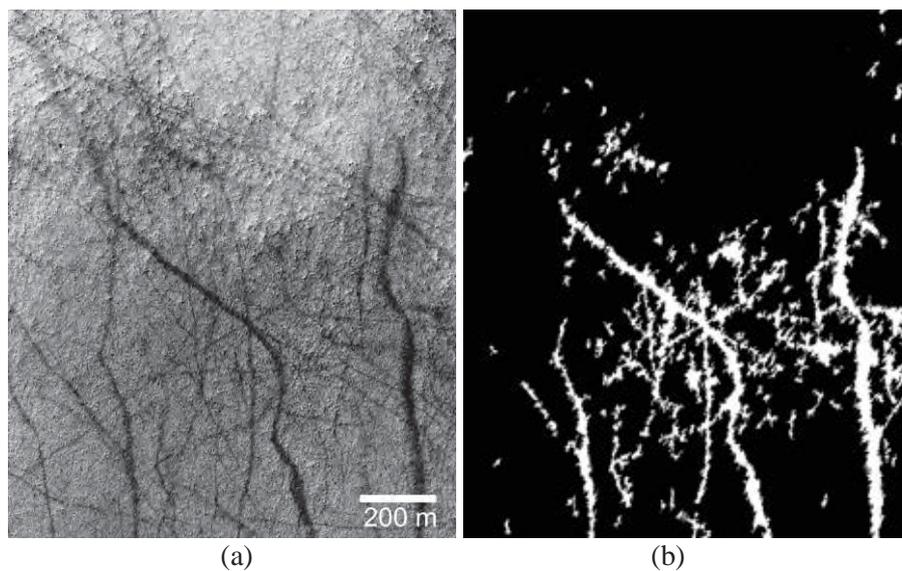
**Figura 76:** Exemplos de desempenho do método: (a-c) sombras de blocos de rocha não foram detectadas como rastros graças à filtragem inicial; (d-i) detecção de rastros com baixo contraste. Os retângulos assinalados em (d) e (g) indicam as áreas mostradas em detalhe em (e, f) e (h, i).

As Figuras 77 a 82 mostram outros casos de sucesso em que os rastros são detectados na presença de crateras, um dos tipos de feição geomorfológica mais presente na superfície do planeta. As imagens exibidas são PSP\_003834\_1650, ESP\_013992\_1170A, PSP\_005659\_1335A, PSP\_005659\_1335C, S09-01660A e ESP\_014004\_1180. Entre todos os casos, apenas na imagem PSP\_003834\_1650 acontece um falso positivo para a cratera mais

ao Norte da cena. Trata-se de uma cratera pequena ao longo da qual houve o cruzamento de vários vórtices, enegrecendo seu interior e provocando uma falha no método. Nos demais casos, as crateras não influenciaram o resultado, mesmo em situações em que há o sombreamento das paredes da cratera, como acontece na imagem ESP\_014004\_1180. As sombras interna e externa das paredes da cratera não foram confundidas com rastros.



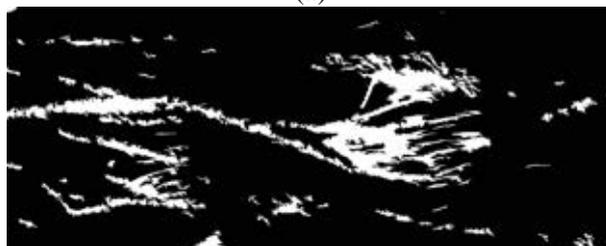
**Figura 77:** Detecção de rastros na imagem PSP\_003834\_1650.



**Figura 78:** Detecção de rastros na imagem ESP\_013992\_1170A.

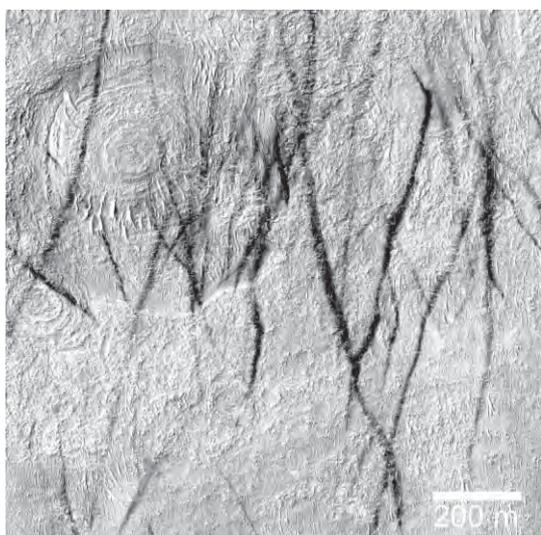


(a)



(b)

**Figura 79:** Detecção de rastros na imagem PSP\_005659\_1335A.



(a)

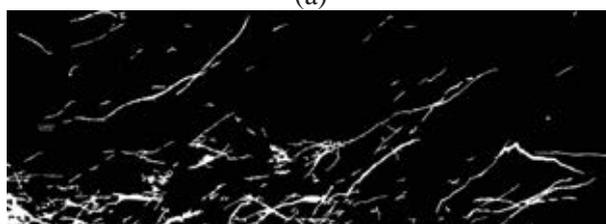


(b)

**Figura 80:** Detecção de rastros na imagem PSP\_005659\_1335C.

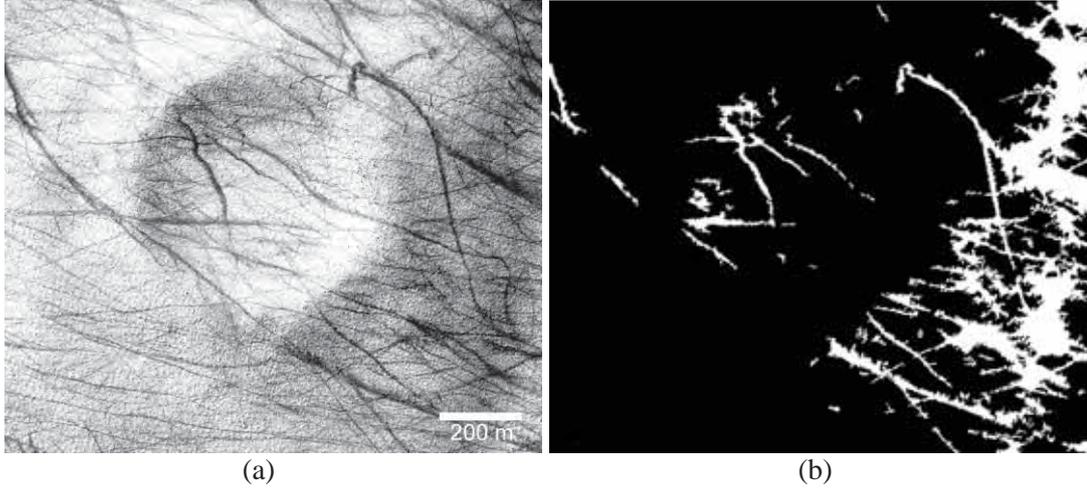


(a)



(b)

**Figura 81:** Detecção de rastros na imagem S09-01660A.



**Figura 82:** Detecção de rastros na imagem ESP\_014004\_1180.

## 4.2 Análise quantitativa dos resultados

A análise quantitativa dos resultados foi feita de acordo com o procedimento proposto por Bandeira et al. (2011) e é baseado na seguinte medida global:

$$\text{Acurácia} = (TP + TN) / (m \times n). \quad (72)$$

Em que  $TP$  é a quantidade de *true positives* e  $TN$  é a quantidade de *true negatives* e  $m, n$  são as dimensões da imagem.

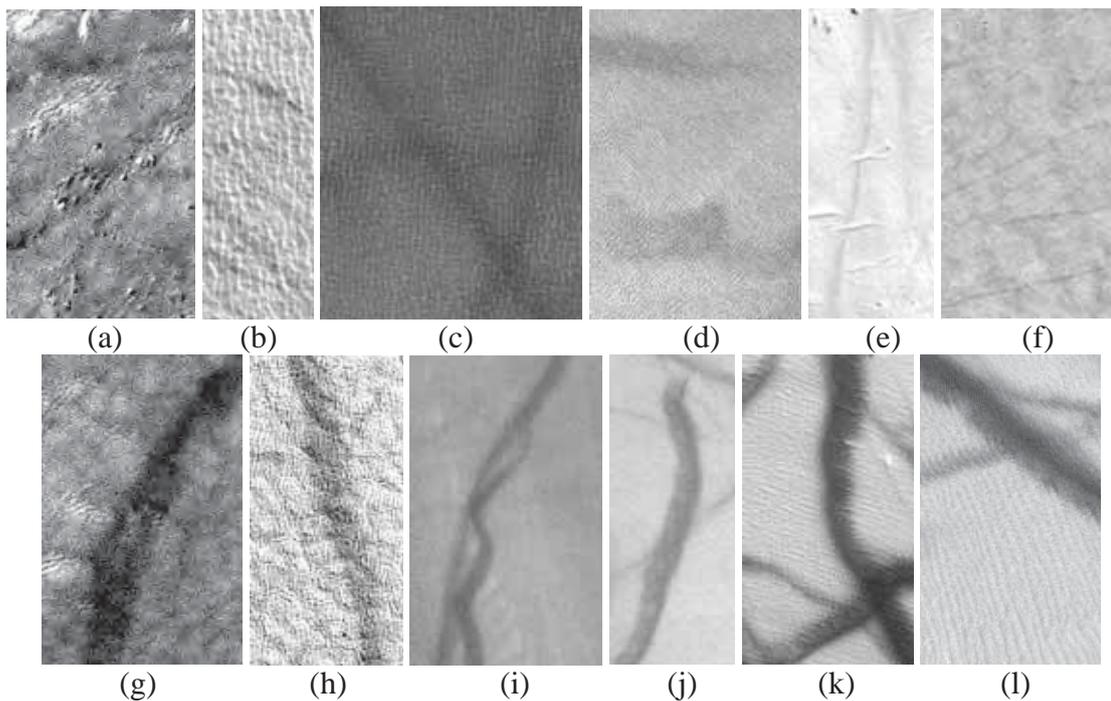
$TP$  e  $TN$  são dados em número de pixels e são definidos relativamente a um *ground truth* ou *imagem de referência*. Para uma imagem processada  $PI$  de acordo com o método proposto e uma imagem de *ground truth*  $GT$ ,  $TP$  e  $TN$  são calculados como:

$$\begin{aligned} TP &= \text{Área}(GT \cap PI) \\ TN &= \text{Área}(C(GT) \cap C(PI)). \end{aligned} \quad (73)$$

Em que  $\cap$  e  $C$  são as operações de interseção e complemento, respectivamente.

Para cada uma das 200 imagens processadas uma imagem *ground truth*, com os rastros marcados, foi feita manualmente. A decisão sobre que rastros deveriam ser marcados

ao fazer o *ground truth* foi norteadada pelo contraste e largura dos rastros. Rastros com largura menor que  $\sim 3$  pixels não foram considerados. A Figura 83 mostra alguns exemplos de rastros que não foram considerados (a-f), especialmente por causa do baixo contraste, e alguns exemplos de rastros que foram marcados (g-l) na criação das imagens *ground truth*. É oportuno ressaltar que, embora rastros muito fracos e mal definidos tenham ficado de fora do *ground truth*, o algoritmo teve bom desempenho também nestas situações.



**Figura 83:** Exemplos de rastros não marcados (a-f) e marcados (g-l) no *ground truth*.

A Figura 84 exibe o *ground truth* feito para as imagens mostradas na Figura 74. A Tabela 5 traz a acurácia na detecção de rastros naquelas imagens. Nesta tabela,  $pFP$  e  $pFN$  são, respectivamente, as probabilidades de *false positives*  $FP$  e *false negatives*  $FN$ , calculadas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} pFN &= FN / (FN + TP) \\ pFP &= FP / (FP + TN). \end{aligned} \tag{74}$$

A Tabela 6 informa o resultado da análise das 200 cenas do banco de imagens. A acurácia média do total de imagens processadas foi  $92,02\% \pm 4,87\%$ . A pior acurácia foi  $69,15\%$ , para a imagem R13-01467, exibida na Figura 74(h), e a melhor foi  $99,34\%$ , para a imagem PSP\_006163\_1345A, exibida na Figura 71.

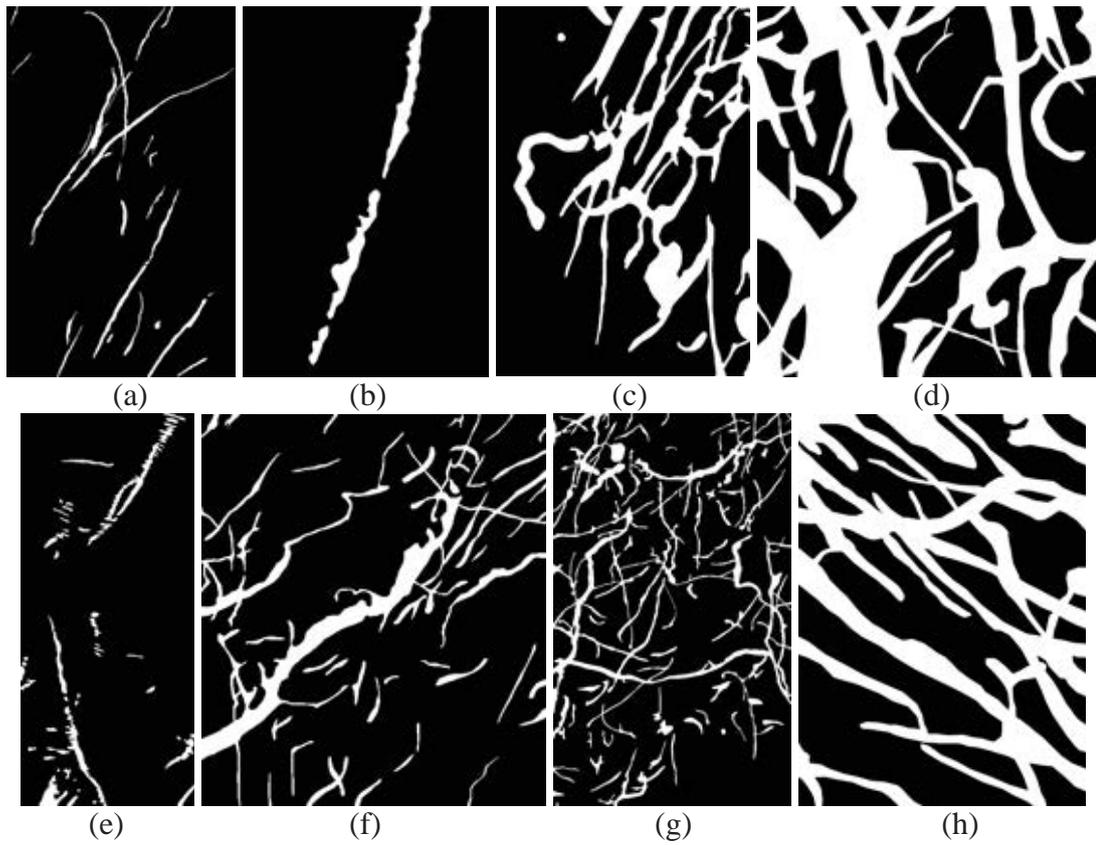


Figura 84: *Ground truth* das imagens mostradas na Figura 74.

Tabela 5: Acurácia da detecção de rastros nas imagens mostradas na Figura 74.

Nome	pFP (%)	pFN (%)	Acurácia (%)
PSP_006163_1345B(a)	0,47	14,88	98,96
PSP_005780_1215(b)	1,59	7,93	98,16
PSP_002548_1255A(c)	1,00	43,00	90,58
PSP_004249_1255(d)	1,38	58,93	71,17
M10-01206(e)	0,87	20,90	97,98
E11-00582(f)	1,67	34,67	94,15
E10-04027(g)	3,36	37,94	91,66
R13-01467(h)	5,03	71,13	69,15

Tabela 6: Acurácia do conjunto de 200 imagens processadas.

	Lat (°)	Lon (°)	LS (°)	Hora local	Largura (pixels)	Altura (pixels)	Acurácia (%)	FP (%)	FN (%)
<b>Mín.</b>	-64,80	0,70	11,22	13:22:00	138	179	69,15	0,15	3,50
<b>Méd.</b>	-53,39	156,06	285,29	14:21:16	2.755	2.457	92,02	3,92	36,19
<b>Desvio</b>	11,31	116,60	59,94	00:31:29	2.445	1.846	4,87	3,63	14,41
<b>Máx.</b>	-14,47	358,80	353,90	16:00:00	9.058	7.526	99,34	19,71	83,91

Observando a Tabela 6 nota-se que a taxa de *false negatives* foi sempre maior que a taxa de *false positives*. Esta diferença é importante quando a intenção é obter informações a partir dos rastros detectados. O fato de *FN* ser maior que *FP* garante que as informações extraídas a partir das imagens processadas provenham majoritariamente de componentes que pertencem a rastros.

A baixa acurácia da imagem R13-01467 se deve ao baixo contraste dos rastros. As bordas dos rastros nesta imagem são muito suaves e o limiar calculado na binarização automática foi 36 quando o ideal (definido manualmente) seria 27.

É importante notar que a acurácia não foi afetada pela variação em resolução espacial das imagens. O método funciona com o mesmo elevado desempenho tanto para imagens MOC quanto para imagens HiRISE, como se percebe na análise das Tabelas 7 e 8, que mostram as acurácias do método de acordo com o tipo de sensor. Também consta, na última coluna das tabelas, o tempo de processamento das imagens, muito maior para as imagens HiRISE do que para as MOC, como era esperado, em função da diferença de tamanho das cenas.

Tabela 7: Estatística para o sensor HiRISE.

<b>HiRISE</b>				
	<b>Acurácia (%)</b>	<b>Largura (pixels)</b>	<b>Altura (pixels)</b>	<b>Tempo (s)</b>
<b>Mín.</b>	71,17	749	540	8,11
<b>Méd.</b>	92,29	4.571	3.577	1.320,10
<b>Desvio</b>	4,72	1.862	1.770	1.347,12
<b>Máx.</b>	99,34	9.058	7.526	6.949,55

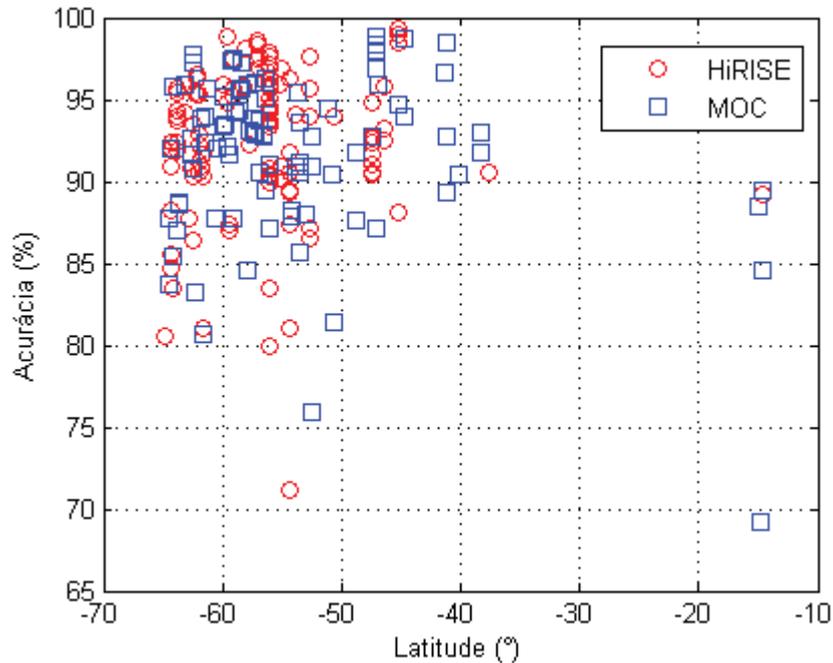
Tabela 8: Estatística para o sensor MOC.

<b>MOC</b>				
	<b>Acurácia (%)</b>	<b>Largura (pixels)</b>	<b>Altura (pixels)</b>	<b>Tempo (s)</b>
<b>Mín.</b>	69,15	138	179	4,10
<b>Méd.</b>	91,69	536	1.089	86,34
<b>Desvio</b>	5,05	264	583	94,21
<b>Máx.</b>	98,85	2.077	3.017	745,75

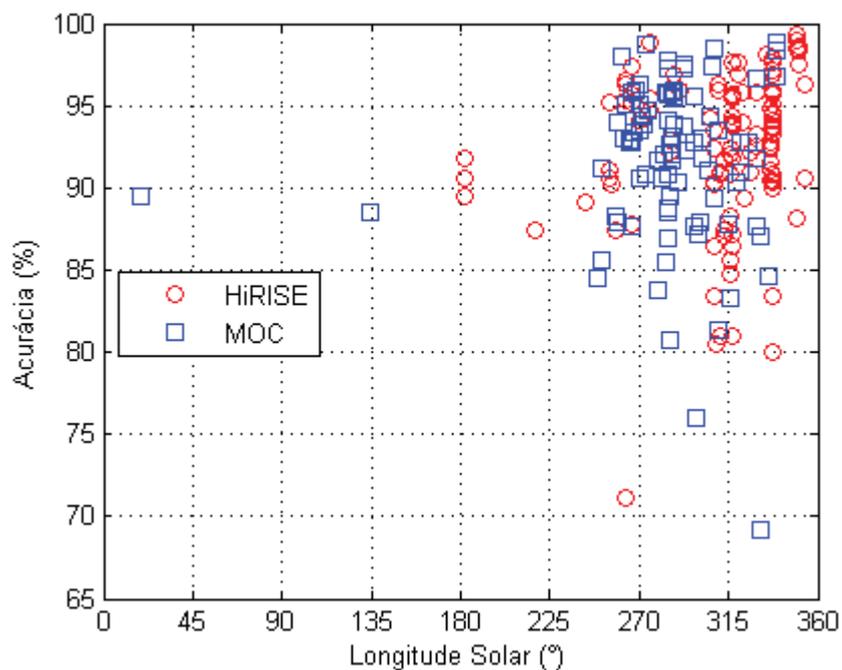
As Figuras 85 e 86 mostram o comportamento da acurácia em função da latitude e longitude solar das cenas, respectivamente. O método não é sensível a estas duas quantidades uma vez que não se podem identificar tendências nos gráficos, o que reforça sua robustez.

A Tabela 9 mostra as acurácias calculadas por região. A região de menor acurácia foi Aeolis, porém, é a região com menor quantidade de imagens. Além disso, dentre todas as

regiões, as imagens de Aeolis exibiam o menor contraste entre rastros e o terreno. Nas regiões de Noachis, Argyre, Eridania e Hellas a detecção teve acurácia semelhante. A maior acurácia média foi obtida para as imagens de Argyre, que é, também, a região com maior quantidade de imagens.



**Figura 85:** Acurácia versus latitude: não há tendências, portanto o método é independente da latitude.



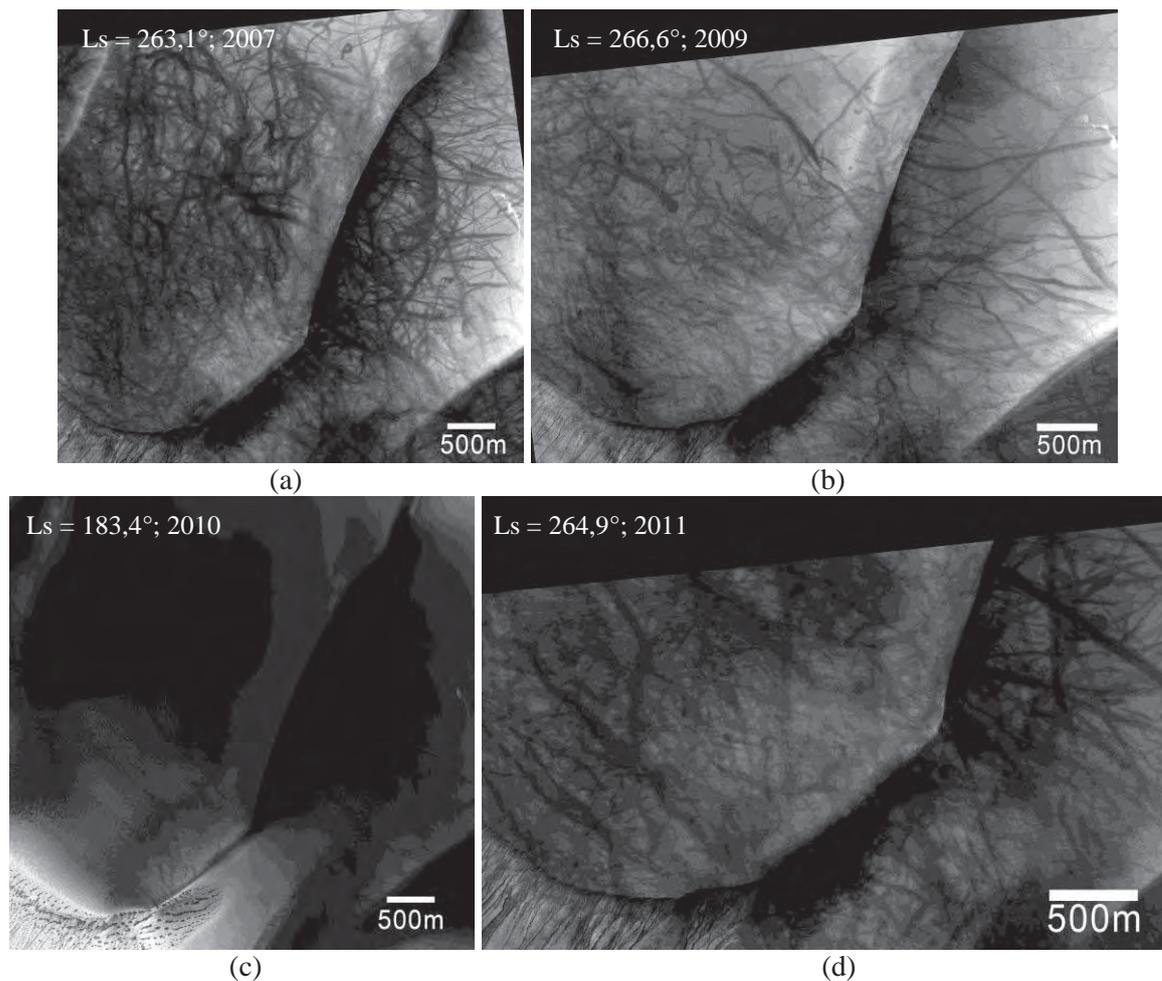
**Figura 86:** Acurácia versus longitude solar: os resultados não mostram dependência da longitude solar.

Tabela 9: Estatística por região.

	Nº de imagens	Acurácia média (%)
<b>Aeolis</b>	5	84,16 ± 8,62
<b>Noachis</b>	39	91,72 ± 5,25
<b>Argyre</b>	71	93,25 ± 4,26
<b>Eridania</b>	45	91,55 ± 4,83
<b>Hellas</b>	40	91,63 ± 4,06

#### 4.2.1 Avaliação em função da variação temporal

Os rastros de *dust devils* são feições altamente transitórias. A Figura 87 mostra mudanças na paisagem de uma mesma região da cratera Russell, durante a primavera marciana (Ls = 180° a 270°), nos anos de 2007, 2009, 2010 e 2011.



**Figura 87:** Variação dos rastros na cratera Russell entre os anos de 2007 a 2011 durante a primavera.

As cenas originais foram recortadas nas coordenadas  $\varphi_1 \sim 28,89^\circ\text{S}$  e  $\lambda_1 \sim 91,34^\circ\text{E}$  ( $\varphi$  e  $\lambda$  são, respectivamente, latitude e longitude), do canto NW, e  $\varphi_2 \sim 29,27^\circ\text{S}$  e  $\lambda_2 \sim 91,46^\circ\text{E}$ , do canto SE. Não é possível reconhecer nenhum rastro remanescente entre os anos nas imagens da Figura 87(a, b, d) (final da primavera) e (c) (início da primavera). As feições se alteram completamente. Mais informações sobre as imagens são dadas na Tabela 10.

Tabela 10: Informações sobre as imagens da Figura 87.

Nome	Data	Lon. solar ( $^\circ$ )	Tamanho (pixels)	Resolução (m)
PSP_004249_1255 (a)	23/06/2007	263,1	19.460 x 19.100	0,25
ESP_013136_1255 (b)	16/05/2009	266,6	19.460 x 15.120	0,25
ESP_020217_1255 (c)	18/11/2010	183,4	19.460 x 19.100	0,25
ESP_021918_1255 (d)	31/03/2011	264,9	15.480 x 10.280	0,25

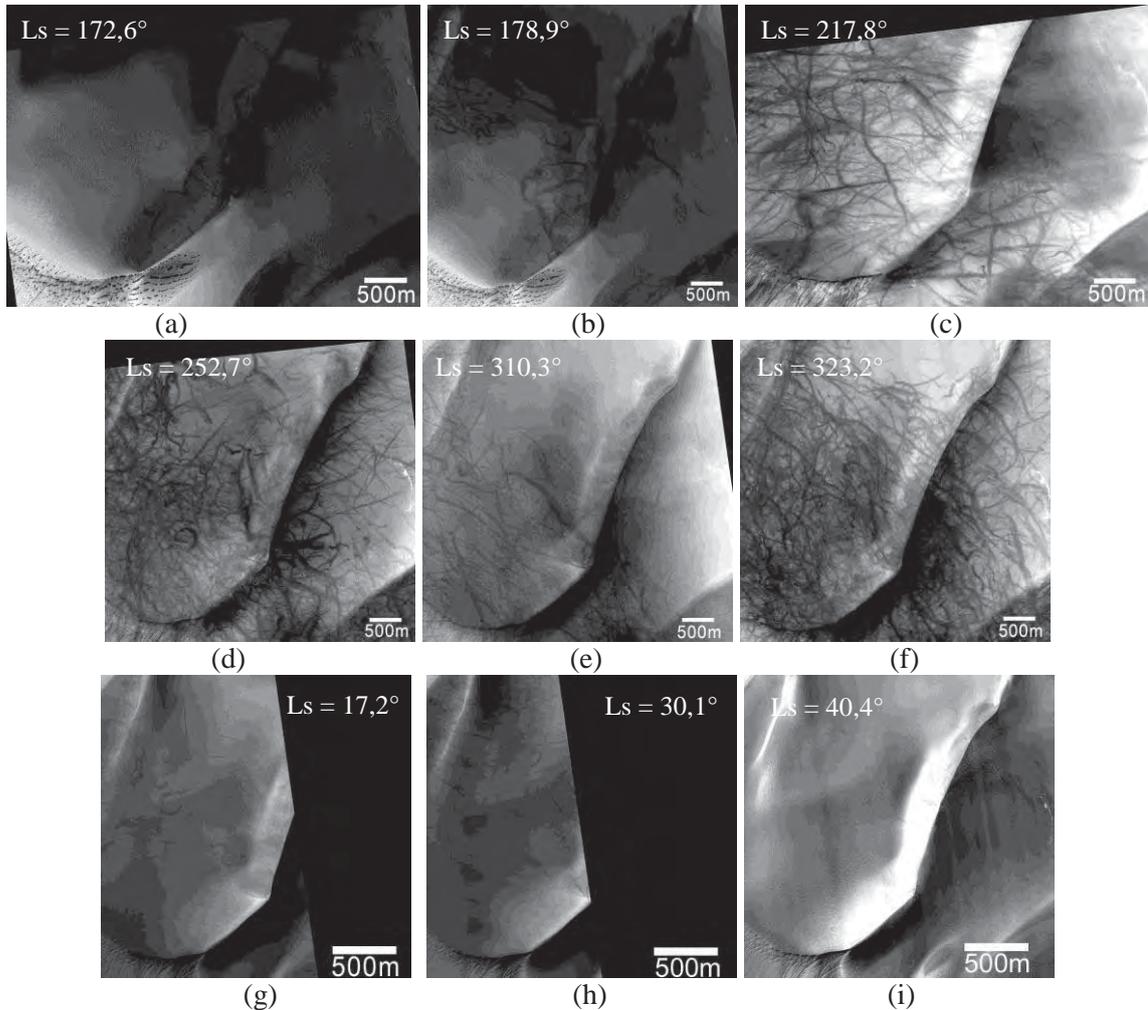


Figura 88: Mudanças nos rastros de *dust devils* na cratera Russell ao longo de um ano marciano.

As Figuras 88(a, b) mostram o aparecimento gradual de rastros no final do inverno marciano, conforme a camada de CO<sub>2</sub> congelado começa a evaporar. As Figuras 88(c-e) mostram a região coberta de rastros na primavera. Em (f) a estação do ano marciana é o verão, momento de maior aparecimento de rastros. As Figuras 88(g-i) mostram a paisagem de outono na cratera Russell, época em que a região volta a ser coberta com uma camada de CO<sub>2</sub> congelado, ocultando os rastros. Mais informações sobre as imagens da Figura 88 são dadas na Tabela 11.

É interessante notar que num período de poucos meses terrestres (2 a 4 meses), como se vê nas Figuras 88(b-d), rastros mais antigos são rapidamente encobertos por sedimentos e substituídos por rastros mais recentes.

Tabela 11: Informações sobre as imagens mostradas na Figura 88.

Nome	Data	Lon. solar (°)	Tamanho (pixels)	Resolução (m)
PSP_002337_1255 (a)	25/01/2007	172,6	19.460 x 14.310	0,25
PSP_002482_1255 (b)	05/02/2007	178,9	19.460 x 19.100	0,25
PSP_003326_1255 (c)	12/04/2007	217,8	19.460 x 14.640	0,25
PSP_004038_1255 (d)	07/06/2007	252,7	19.460 x 19.100	0,25
PSP_005238_1255 (e)	08/09/2007	310,3	19.460 x 19.100	0,25
PSP_005528_1255 (f)	01/10/2007	323,2	19.460 x 19.100	0,25
PSP_006873_1255 (g)	13/01/2008	17,2	9.730 x 9.550	0,25
PSP_007229_1255 (h)	10/02/2008	30,1	9.730 x 9.550	0,50
PSP_007519_1255 (i)	04/03/2008	40,4	9.730 x 9.550	0,50

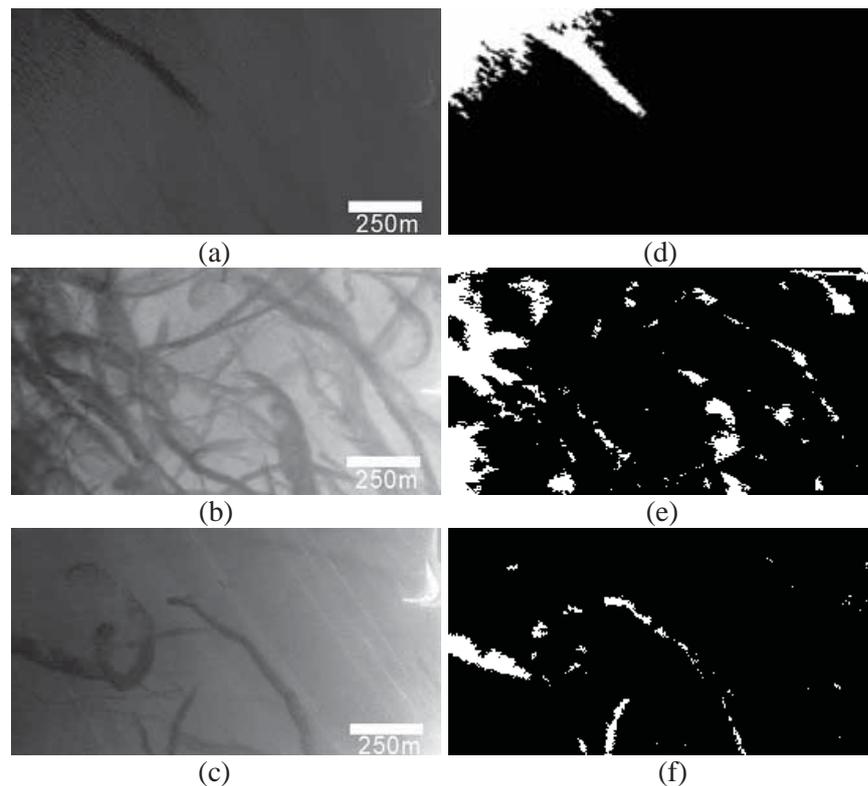
A Figura 89 mostra o resultado da detecção dos rastros na região da cratera Russell compreendida entre as coordenadas  $\varphi_1 \sim 29,08^\circ\text{S}$  e  $\lambda_1 \sim 91,29^\circ\text{E}$ , do canto NW, e  $\varphi_2 \sim 29,33^\circ\text{S}$  e  $\lambda_2 \sim 91,43^\circ\text{E}$ , do canto SE, durante o inverno (Figuras 89(a, d)), primavera (Figuras 89(c, f)) e verão (Figuras 89(b, e)) marcianos.

As imagens mostradas na Figura 89 possuem dimensão de 5.891 x 3.126 pixels e a acurácia global da detecção é mostrada na Tabela 12.

Tabela 12: Informações sobre as imagens mostradas na Figura 89.

Nome	Data	Lon. solar (°)	Resolução (m)	Acurácia (%)
PSP_002482_1255 (a)	05/02/2007	178,9	0,25	0,9709
PSP_005528_1255 (b)	01/10/2007	323,2	0,25	0,8005
ESP_021496_1255 (c)	26/02/2011	244,1	0,25	0,9411

A acurácia global média foi de 90,41%  $\pm$  9,10%. Este resultado reforça a conclusão de que a acurácia alcançada pelo método é independente da longitude solar das imagens.



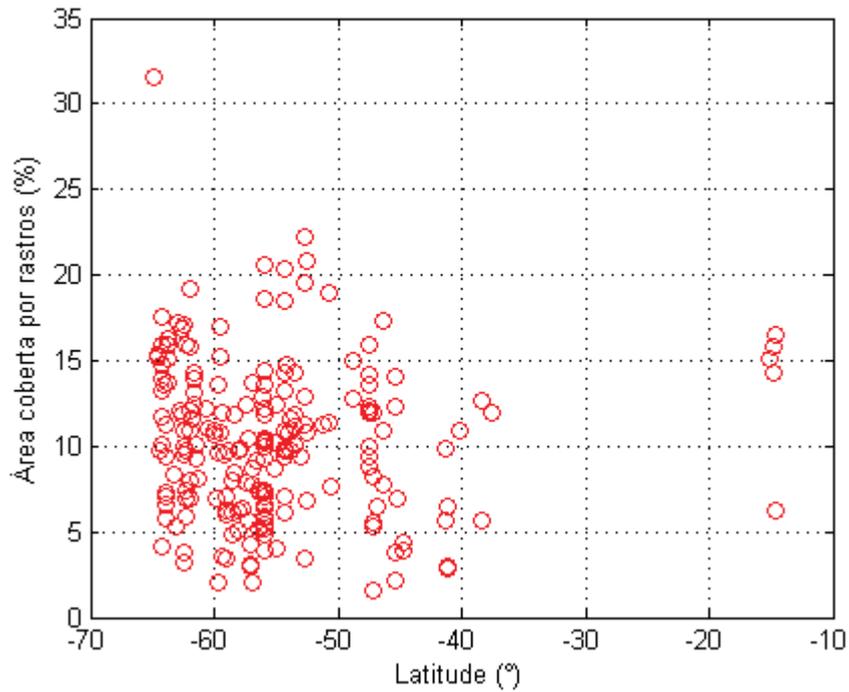
**Figura 89:** Detecção de rastros em uma região da cratera Russell. (a, d): inverno ( $L_s = 178,9^\circ$ ); (b, e): verão ( $L_s = 323,2^\circ$ ); e (c, f): primavera ( $L_s = 244,1^\circ$ ).

### 4.3 Caracterização dos rastros detectados

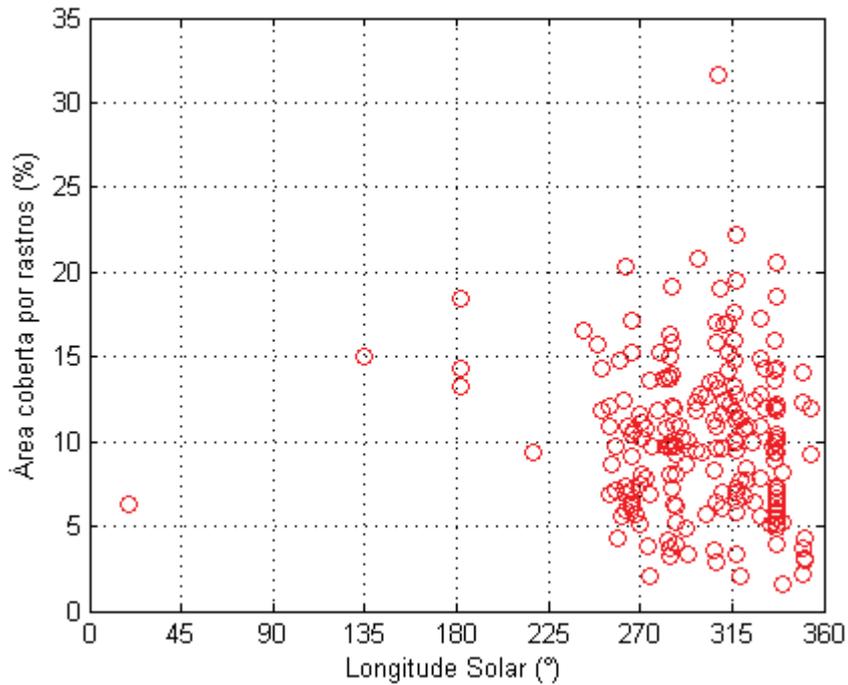
As imagens binárias com rastros detectados podem ser usadas para inferir algumas características dos *dust devils*, como frequência, diâmetro médio e direção preponderante de deslocamento, dentre outras.

#### 4.3.1 Largura média, contraste relativo e área coberta por rastros

A quantidade de área coberta por rastros é facilmente obtida pela contagem de pixels relevantes no resultado da detecção. As Figuras 90 e 91 mostram a variação da área coberta por rastros em função da latitude e da longitude solar, respectivamente. A área coberta por rastros de *dust devils* pode ser usada para estimar a quantidade de areia e poeira ejetada pelo vórtice na atmosfera, como fizeram Balme, Whelley e Greeley (2003).



**Figura 90:** Variação da área coberta por rastros em função da latitude.



**Figura 91:** Variação da área coberta por rastros em função da longitude solar.

É importante conhecer a quantidade de material que é espalhado pelos vórtices já que autores como Drake et al. (2006) e Reiss, Zanetti e Neukum (2011) acreditam que *dust devils* contribuem com até 50% da poeira e areia suspensas na atmosfera. A Figura 90 exhibe

uma leve tendência para o aumento da área coberta em função do aumento da latitude. Este comportamento foi previsto por Whelley e Greeley (2006) e Stanzel et al. (2008). No caso da Figura 91, o gráfico não exhibe tendências e não é possível concluir, para as imagens consideradas, que haja alguma relação entre a formação de *dust devils* com relação à longitude solar. Porém, as imagens foram coletadas propositalmente na primavera e verão, épocas propícias ao aparecimento do fenômeno. O que se pode dizer neste caso é que para estas imagens não houve diferença significativa na cobertura de rastros entre as duas estações referidas. Se outras imagens nas estações do outono e inverno fizessem parte do banco de imagens muito provavelmente seria perceptível uma tendência para o aumento do recobrimento de rastros em função do aumento de longitude solar.

A partir dos resultados é possível também calcular o contraste relativo entre os rastros e as regiões vizinhas. Tal informação pode ser usada para levantar hipóteses sobre a espessura da camada de areia que recobre o local. Verba et al. (2010) comentam que quanto mais espessa a camada de areia, maior deverá ser o *dust devil* para que o substrato fique aparente e o rastro seja percebido, como acontece na cratera Gusev. Ao contrário, ainda de acordo com os autores, se a camada é mais fina, ela é espalhada mais facilmente e vórtices menores, mais comuns, são capazes de deixar rastros, como na cratera Russell.

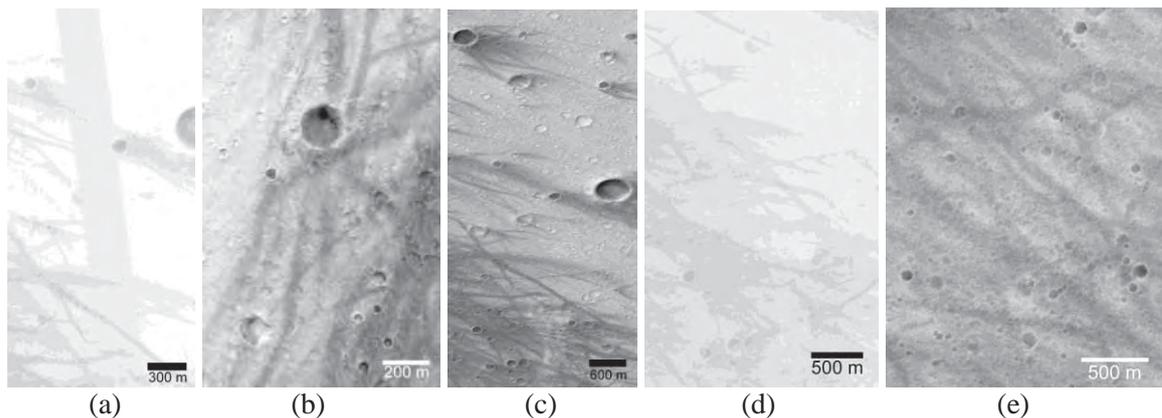
Primeiro é preciso definir uma vizinhança entorno dos rastros. Isso pode ser feito por uma dilatação. A diferença aritmética entre a imagem dilatada e a binária produz marcadores da vizinhança. A intersecção da imagem de marcadores com a imagem original, em tons de cinza, resgata a informação de brilho na vizinhança dos rastros. De maneira semelhante, a informação de brilho dos rastros é recuperada ao se fazer a intersecção da imagem binária com a imagem original em tons de cinza. A diferença entre as médias de brilho da região vizinha e dos rastros dá uma estimativa do contraste entre as duas regiões. A Tabela 13 lista informações sobre a porcentagem de área coberta por rastros e sobre o contraste relativos destes com as áreas vizinhas.

Tabela 13: Informações de contraste e cobertura de rastros por região.

	Nº de imagens	Cobertura (%)	Contraste médio
<b>Aeolis</b>	5	13,60	0,15
<b>Noachis</b>	39	10,41	0,20
<b>Argyre</b>	71	9,68	0,20
<b>Eridania</b>	45	10,39	0,20
<b>Hellas</b>	40	10,52	0,26

O contraste na Tabela 13 foi normalizado para o intervalo [0, 1] ao se dividir as diferenças de brilho entre os rastros e suas regiões vizinhas por 255 (valor máximo admissível nas imagens digitais usadas). É interessante notar que o contraste entre rastros e vizinhança foi igual para as regiões Noachis, Argyre e Eridania. A região de menor contraste foi Aeolis, com pior acurácia na detecção. Se Verba et al. (2010) estiverem certos, a região em Aeolis onde as imagens foram tomadas possui uma camada de areia mais espessa do que as demais e Hellas seria uma região com recobrimento mais fino.

De fato, a cratera Gusev que, segundo os autores, possui uma camada espessa de areia e poeira recobrindo sua superfície, encontra-se na região de Aeolis. E a cratera Russell, com recobrimento supostamente mais fino, localiza-se em Noachis. A Figura 92 mostra as imagens de Aeolis e nelas é fácil perceber como é baixo o contraste entre os rastros e o terreno.



**Figura 92:** Imagens da região de Aeolis.

Na Tabela 13 nota-se, ainda, que a região com maior percentagem de área coberta por rastros foi Aeolis e a menor foi Argyre. Noachis, Eridania e Hellas mostram percentuais bastante parecidos. É preciso ter em mente que estes valores foram influenciados pelo recorte das cenas originais em regiões de interesse, que raramente tinham o mesmo tamanho.

A vizinhança considerada para medida de brilho e posterior cálculo do contraste variou de cena para cena e foi definida com base na largura média dos rastros em cada imagem: a área vizinha dos rastros tinha a largura igual à largura média dos rastros na cena. A largura média dos rastros foi calculada com base na análise granulométrica das imagens feita por elementos estruturantes *discos*. Esta largura média dá uma ideia do diâmetro do vórtice dos *dust devils* e também pode ser utilizada para calcular probabilidades de ocorrência dos mesmos, de acordo com seus tamanhos, como descreve Lorenz (2009, 2011b). A Tabela 14

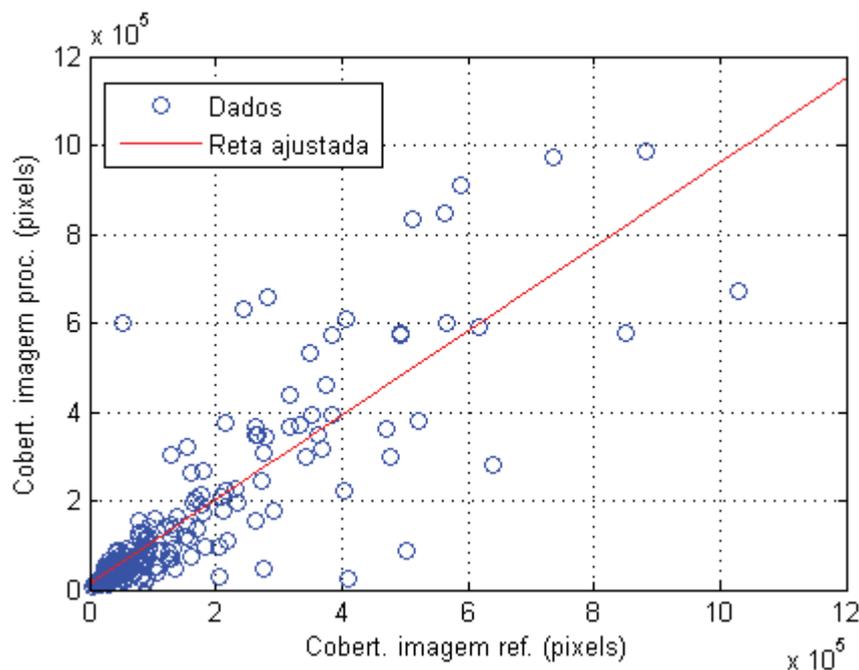
contém as larguras média e máxima dos rastros para as regiões Aeolis, Argyre, Noachis, Eridania e Hellas.

Além de calcular a acurácia média global do método de detecção, é importante saber o quão confiável são as informações inferidas a partir dos rastros detectados. Para determinar a acurácia com que as informações de contraste, largura e percentagem de área coberta foram inferidas, a partir das imagens binárias com rastros, tais informações foram calculadas também a partir do *ground truth*.

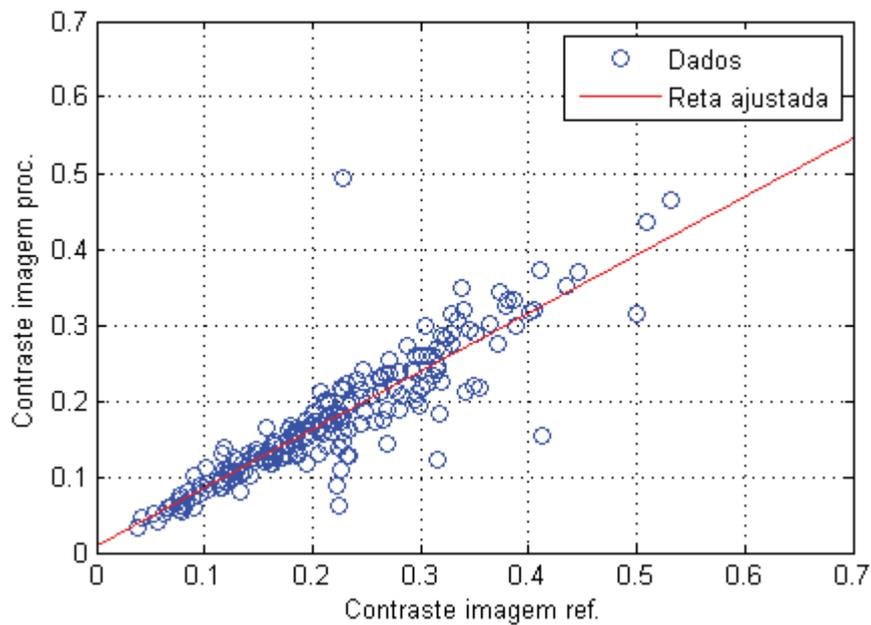
Tabela 14: Largura dos rastros por região.

	Largura média dos rastros (m)	Largura máxima dos rastros (m)
<b>Aeolis</b>	43,58	283,46
<b>Noachis</b>	36,96	159,93
<b>Argyre</b>	28,83	106,63
<b>Eridania</b>	51,35	208,41
<b>Hellas</b>	64,24	272,60

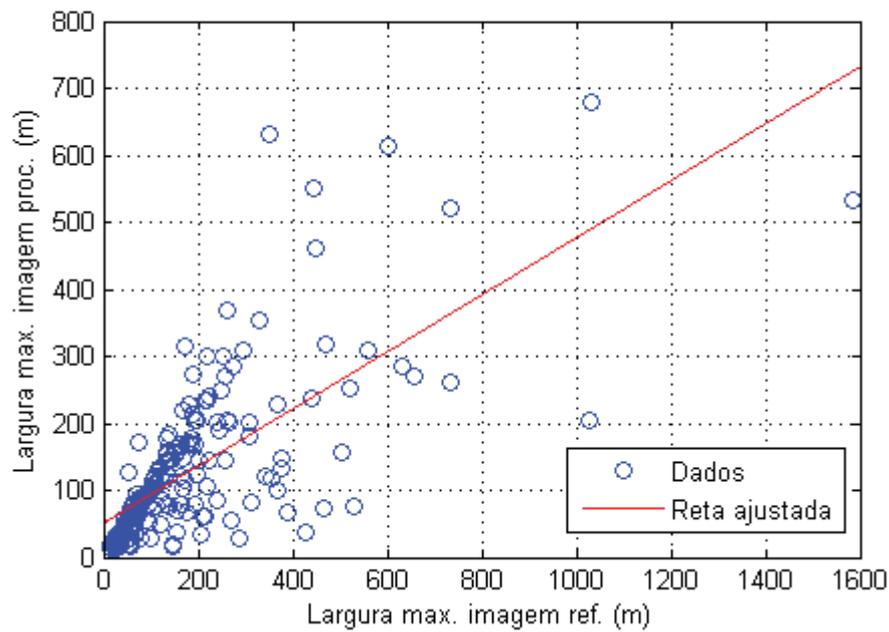
Como as quantidades se comportam de maneira aproximadamente linear (Figuras 93 a 96), foram calculados os coeficientes de correlação entre as informações obtidas diretamente sobre as imagens processadas e aquelas obtidas do *ground truth*.



**Figura 93:** Relação entre a cobertura de rastros calculada a partir das imagens processadas e de *ground truth*.



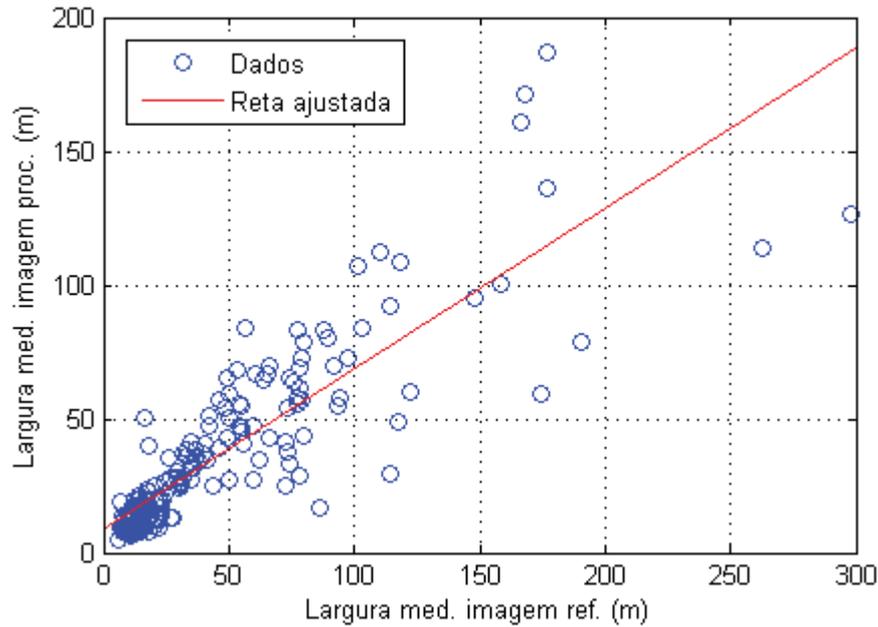
**Figura 94:** Relação entre o contraste calculado a partir das imagens processadas e de *ground truth*.



**Figura 95:** Relação entre a largura máxima dos rastros calculada a partir das imagens processadas e de *ground truth*.

Os coeficientes de correlação obtidos, que informam sobre a qualidade do ajustamento linear dos dados, foram 89,05% para o contraste, 84,70% para a percentagem de área coberta, 86,15% para a largura média e 70,95% para largura máxima. Três das quatro variáveis mostram correlações elevadas e, portanto, indicam o excelente desempenho das detecções. O valor mais baixo de correlação para a largura máxima pode ser explicado de

duas maneiras: como se nota na Figura 95 a quantidade não apresentou um comportamento fortemente linear e, nesses casos, o coeficiente de correlação pode não ser tão confiável para medir o grau de adesão entre as informações calculadas a partir dos dois conjuntos de imagens; além disso, a largura máxima é extremamente sensível ao limiar de binarização já que rastros com tom de cinza semelhante e muito próximos um do outro podem se tornar uma estrutura só quando binarizados.



**Figura 96:** Relação entre a largura média dos rastros calculada a partir das imagens processadas e de *ground truth*.

As Tabelas 15 e 16 mostram informações sobre percentagem de área coberta por rastros, contraste relativo e larguras média e máxima para as imagens mostradas na Figura 74. As quantidades foram calculadas a partir das imagens processadas (Tabela 15) e do *ground truth* (Tabela 16).

Tabela 15: Características calculadas para as imagens da Figura 75 (imagens processadas).

Nome	Área (%)	Contraste	Largura (m)	
			Méd.	Máx.
PSP_006163_1345B(a)	3,76	0,37	10,40	33,75
PSP_005780_1215(b)	5,11	0,38	12,70	26,25
PSP_002548_1255A(c)	14,27	0,07	19,21	83,25
PSP_004249_1255(d)	20,31	0,12	22,84	189,75
M10-01206(e)	5,55	0,24	63,84	300,85
E11-00582(f)	9,72	0,17	89,45	191,73
E10-04027(g)	11,80	0,12	16,48	176,67
R13-01467(h)	14,34	0,24	23,83	170,17

Tabela 16: Características calculadas para as imagens da Figura 84 (*ground truth*).

Nome	Área (%)	Contraste	Largura (m)	
			Méd.	Máx.
PSP_006163_1345B(a)	3,88	0,34	10,30	32,25
PSP_005780_1215(b)	3,89	0,30	16,83	27,75
PSP_002548_1255A(c)	21,40	0,06	13,96	81,75
PSP_004249_1255(d)	47,69	0,12	18,84	213,75
M10-01206(e)	5,75	0,19	64,31	205,35
E11-00582(f)	12,64	0,13	80,48	203,35
E10-04027(g)	14,40	0,10	45,61	167,61
R13-01467(h)	39,06	0,06	19,55	218,79

A Tabela 17 mostra as discrepâncias absolutas entre os valores das Tabelas 15 e 16. As maiores diferenças em porcentagem de área coberta acontecem para as imagens de pior acurácia na detecção: PSP\_004249\_1255 (71,17% de acurácia) e R13-01467 (69,15% de acurácia). A maior diferença para largura média ocorreu com a imagem E10-04027 (33,66 m) que, apesar da acurácia de 91,66%, apresentou uma alta taxa de falsos negativos na detecção. As imagens M10-01206 e R13-01467 apresentaram as maiores discrepâncias para a largura máxima. Esta quantidade é bastante sensível ao limiar de binarização. Pequenas mudanças no limiar podem provocar a união de componentes conectados nas imagens finais. Esse foi o caso da imagem M10-01206: na imagem processada é possível ver um aglomerado de rastros que foi compactado no canto inferior da cena. No caso da imagem R13-01467 a diferença deve ser atribuída ao mau desempenho da detecção. A diferença em contraste foi pequena para todas as imagens, com exceção da R13-01467 e a menor delas ocorreu para a imagem PSP\_004249\_1255, apesar da baixa acurácia na detecção (71,17%).

Tabela 17: Discrepâncias ( $\Delta$ ) entre as características calculadas a partir das imagens processadas (Tabela 15) e a partir do *ground truth* (Tabela 16) para as imagens da Figura 74.

Nome	Acurácia (%)	$\Delta$ Área (%)	$\Delta$ Contraste	$\Delta$ Largura (m)	
				Méd.	Máx.
PSP_006163_1345B(a)	98,96	0,12	0,03	0,09	1,50
PSP_005780_1215(b)	98,16	1,22	0,08	4,12	1,50
PSP_002548_1255A(c)	90,58	7,13	0,01	5,26	1,50
PSP_004249_1255(d)	71,17	27,38	0,00	4,00	24,00
M10-01206(e)	97,98	0,20	0,05	0,47	55,50
E11-00582(f)	94,15	2,92	0,04	8,97	11,61
E10-04027(g)	91,66	2,60	0,02	29,13	9,06
R13-01467(h)	69,15	24,72	0,18	4,28	48,62

### **4.3.2 Direção preponderante de deslocamento dos vórtices**

A seguir são abordados três métodos que podem ser aplicados na medida da direção dos rastros. A acurácia de cada um deles para o conjunto de imagens utilizadas neste trabalho é calculada e discutida. Posteriormente, são feitas considerações sobre a influência das projeções cartográficas na medida de direções. Finalmente, as direções calculadas são comparadas com as direções previstas pelo GCM (para o caso de Argyre) e com direções inferidas pela análise visual de feições eólicas, conforme relatos encontrados na literatura.

#### **4.3.2.1 Métodos para determinação das direções**

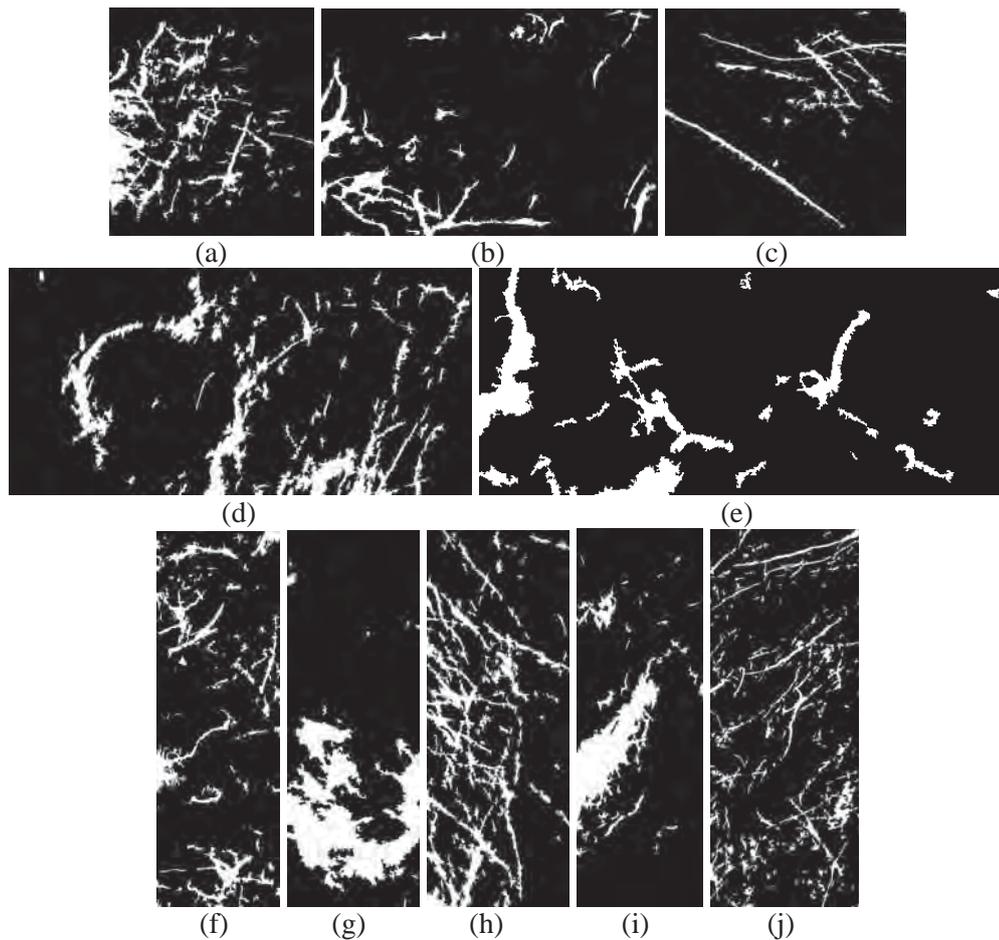
Outra característica de grande interesse é a direção preponderante de deslocamento dos *dust devils*, o que pode ser inferido pelos seus rastros. Para definir as direções dos rastros, três abordagens foram testadas:

- I. Granulometria com elementos estruturantes lineares;
- II. Cálculo da direção do vetor gradiente; e
- III. Aberturas direcionais com elementos estruturantes lineares.

A análise dos dados de direção se divide em dois problemas: a) qual é a acurácia do método empregado para medir as direções? e b) qual é a acurácia das direções dos rastros medidas a partir das imagens processadas (*output* do método de detecção)? Para responder a estas questões um *conjunto de direções de referência* foi criado a partir da *análise visual* das imagens. Em 10 das 200 imagens, os rastros não apresentaram claramente uma direção predominante e estes casos foram, portanto, ignorados. As 10 imagens que não fizeram parte da análise são mostradas na Figura 97. O conjunto de referência foi então comparado com as direções obtidas por cada um dos métodos (I, II e III) aplicados ao *ground truth* dos rastros (resolução do problema (a)) e a às *imagens processadas* (resolução do problema (b)). Em todos os casos, a medida de acurácia foi feita com base na matriz de confusão dos dados (RICHARDS e JIA, 1998; NOVO, 2008).

I) Granulometria com elementos estruturantes lineares

Este método teve como dados de entrada as imagens esqueletizadas pelo algoritmo de Zhang e Suen (as granulometrias poderiam ser aplicadas nas imagens binárias, mas a espessura dos rastros provocaria erros de interpretação) e posteriormente filtradas por *pruning*. Nesta operação, segmentos de esqueleto com até 10 m de comprimento foram filtrados. As aberturas que compuseram a granulometria foram feitas com elementos estruturantes lineares nas direções 0°, 45°, 90° e 135°. A direção eleita como preponderante foi aquela para a qual a frequência acumulada do *espectro padrão* foi maior. A Tabela 18 apresenta a matriz de confusão para as *direções de referência*, definidas visualmente, versus as direções obtidas a partir da aplicação do método sobre o *ground truth*.



**Figura 97:** Imagens que não foram consideradas na análise dos dados: (a) R08-02621; (b) E13-00271; (c) PSP\_005846\_1235N; (d) PSP\_005846\_1235V; (e) E11-04510; (f) R12-02283; (g) R11-02327; (h) R10-03758; (i) R13-01492; e (j) E11-01270.

Tabela 18: Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções obtidas a partir da aplicação da granulometria sobre o *ground truth*.

Dados Processados	Dados de Referência				Total da linha
	0°	45°	90°	135°	
0°	80	1	5	5	91
45°	3	16	2	0	21
90°	3	1	53	2	59
135°	2	0	5	12	17
<b>Total da coluna</b>	88	18	65	19	190

A acurácia global a partir da matriz de confusão é calculada como a razão entre a diagonal da matriz e o número total de elementos (FIDALGO, 1995; RICHARDS e JIA, 1998):

$$Acurácia = \frac{\sum x_{ii}}{N}. \quad (75)$$

Em que  $x_{ii}$  é o número de observações na linha  $i$  com a coluna  $i$  e  $N$  é o número total de observações.

Com base na Tabela 18, a acurácia para este método foi de 84,74%. Em seguida a comparação foi feita entre as direções de referência e as direções obtidas pelo método aplicado ao esqueleto das imagens processadas. A Tabela 19 mostra a matriz de confusão para os dados. Neste caso, a acurácia foi de 66,32%.

Tabela 19: Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções obtidas a partir da aplicação da granulometria sobre as *imagens processadas*.

Dados Processados	Dados de Referência				Total da linha
	0°	45°	90°	135°	
0°	61	1	2	3	67
45°	26	14	13	9	62
90°	1	3	49	5	58
135°	0	0	1	2	3
<b>Total da coluna</b>	88	18	65	19	190

## II) Cálculo da direção do vetor gradiente

Este método teve como dados de entrada as imagens processadas e de referência binárias. O gradiente foi calculado pelo operador de *Prewitt*. A direção do gradiente foi calculada por:

$$\alpha(x, y) = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{g_y}{g_x} \right]. \quad (76)$$

As quantidades  $g_x$  e  $g_y$  para o operador de *Prewitt* são obtidas por:

$$g_x = \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad g_y = \frac{\partial f}{\partial y} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (77)$$

A equação 79 resulta em valores reais de direção no intervalo  $[-180, 180]$ . Os ângulos negativos foram transformados em positivos ao serem subtraídos de  $180^\circ$ . Os valores reais resultantes da operação, compreendidos no intervalo  $[0^\circ, 180^\circ]$ , foram classificados em  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  ou  $135^\circ$ , conforme o critério:

$$\alpha(x, y) = \begin{cases} 0^\circ & \text{se } \alpha(x, y) \leq 22,5^\circ \text{ ou } \alpha(x, y) > 157,5^\circ \\ 45^\circ & \text{se } 22,5^\circ < \alpha(x, y) \leq 67,5^\circ \\ 90^\circ & \text{se } 67,5^\circ < \alpha(x, y) \leq 112,5^\circ \\ 135^\circ & \text{se } 112,5^\circ < \alpha(x, y) \leq 157,5^\circ \end{cases} \quad (78)$$

A Tabela 20 mostra a matriz de confusão para o método. A acurácia do método ficou em 48,95%.

Tabela 20: Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções dos gradientes calculados a partir do *ground truth*.

Dados Processados	Dados de Referência				Total da linha
	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	
$0^\circ$	42	0	0	0	42
$45^\circ$	17	18	25	0	60
$90^\circ$	0	0	14	0	14
$135^\circ$	29	0	26	19	74
<b>Total da coluna</b>	88	18	65	19	190

A Tabela 21 apresenta a matriz de confusão para as direções de referência versus as direções calculadas a partir das imagens processadas com base no gradiente. A acurácia foi de 20%.

Tabela 21: Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções dos gradientes calculados a partir das *imagens processadas*.

<b>Dados Processados</b>	<b>Dados de Referência</b>				<b>Total da linha</b>
	0°	45°	90°	135°	
0°	3	0	0	1	4
45°	64	18	35	6	123
90°	0	0	5	0	5
135°	21	0	25	12	58
<b>Total da coluna</b>	88	18	65	19	190

### III) Aberturas direcionais com elementos estruturantes lineares

Este método teve como dados de entrada as imagens processadas e de referência binárias. Foram aplicadas aberturas com elementos estruturantes lineares orientados nas direções 0°, 45°, 90° e 135°. O tamanho dos elementos estruturantes variou de imagem para imagem (de 7 a 181 pixels) e foi definido como sendo igual à largura máxima dos rastros, calculada com base em uma granulometria com elementos estruturantes discos. A direção preponderante, neste caso, é aquela na qual a abertura filtrou *menos* pixels. A Tabela 22 apresenta a matriz de confusão para as direções de referência versus direções obtidas a partir das imagens de *ground truth*. A acurácia do método foi de 96,84%.

A Tabela 23 apresenta a matriz de confusão para as direções calculadas a partir das imagens processadas. A acurácia para os dados calculados a partir das imagens processadas foi de 86,32%. Se os 3,16% de falha do método forem desconsiderados, e as 6 imagens correspondentes retiradas da análise, temos o panorama apresentado na Tabela 24. Neste caso, a acurácia para as direções calculadas a partir das imagens processadas, com base nas aberturas direcionais, foi de 87,91%. Com isso é possível concluir que a acurácia de 92,02%  $\pm$  4,87% obtida na detecção dos rastros permite que a direção preponderante dos mesmos seja calculada com uma acurácia de 87,91%, caso sejam desconsideradas falhas do método empregado, e 86,32% no caso geral em que se incluem todas as observações.

Tabela 22: Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções calculadas por aberturas direcionais sobre o *ground truth*.

<b>Dados Processados</b>	<b>Dados de Referência</b>				<b>Total da linha</b>
	0°	45°	90°	135°	
0°	88	1	2	1	92
45°	0	17	0	0	17
90°	0	0	61	0	61
135°	0	0	2	18	20
<b>Total da coluna</b>	88	18	65	19	190

Tabela 23: Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções calculadas por aberturas direcionais sobre as *imagens processadas*.

<b>Dados Processados</b>	<b>Dados de Referência</b>				<b>Total da linha</b>
	0°	45°	90°	135°	
0°	78	1	2	6	87
45°	1	13	0	0	14
90°	8	4	63	3	78
135°	1	0	0	10	11
<b>Total da coluna</b>	88	18	65	19	190

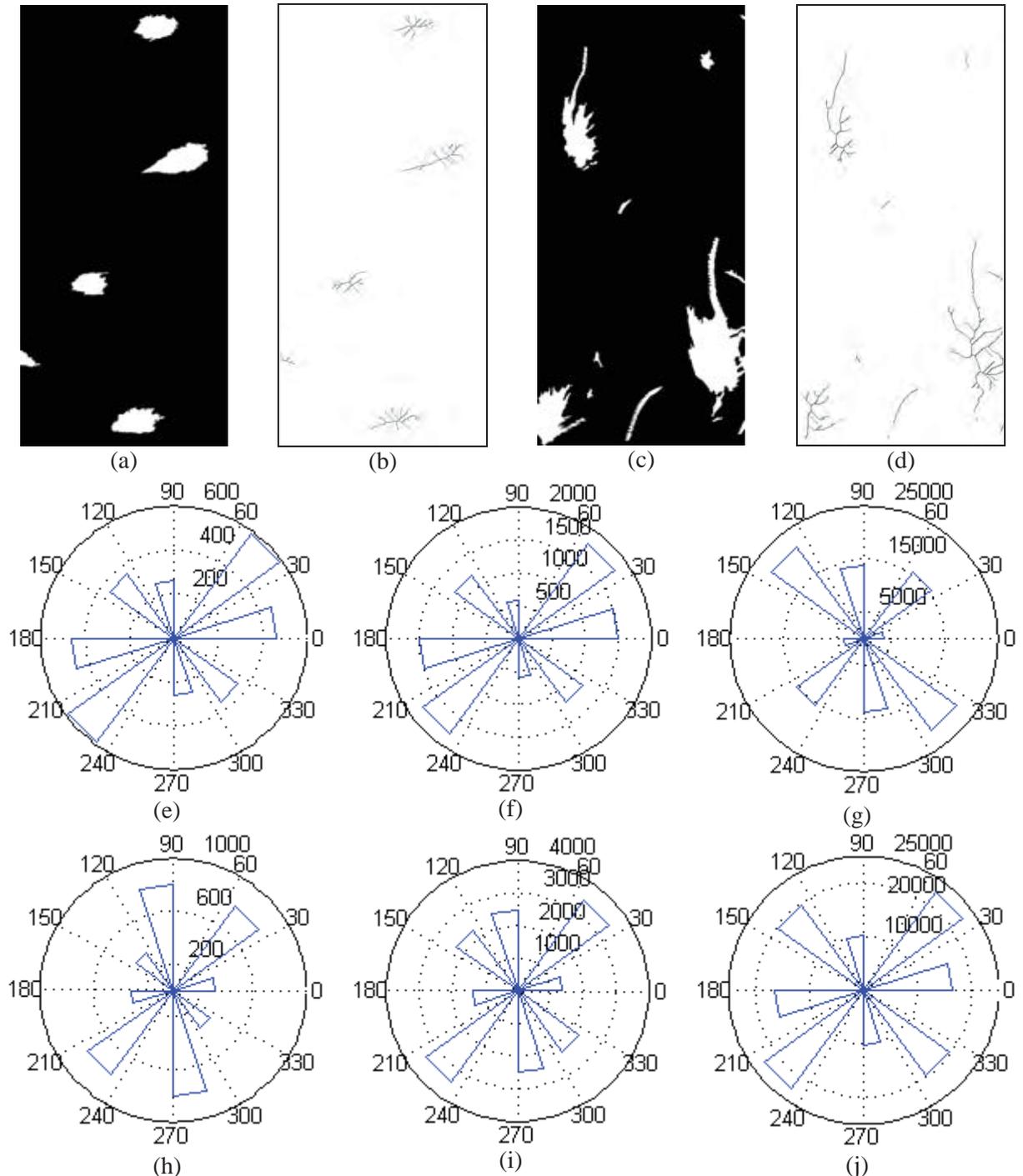
Tabela 24: Matriz de confusão para as direções de referência, definidas visualmente, versus as direções calculadas por aberturas direcionais sobre as *imagens processadas* (desconsiderando os 3,16% de falha do método).

<b>Dados Processados</b>	<b>Dados de Referência</b>				<b>Total da linha</b>
	0°	45°	90°	135°	
0°	78	1	2	6	87
45°	1	13	0	0	14
90°	8	3	59	2	72
135°	1	0	0	10	11
<b>Total da coluna</b>	88	17	61	18	184

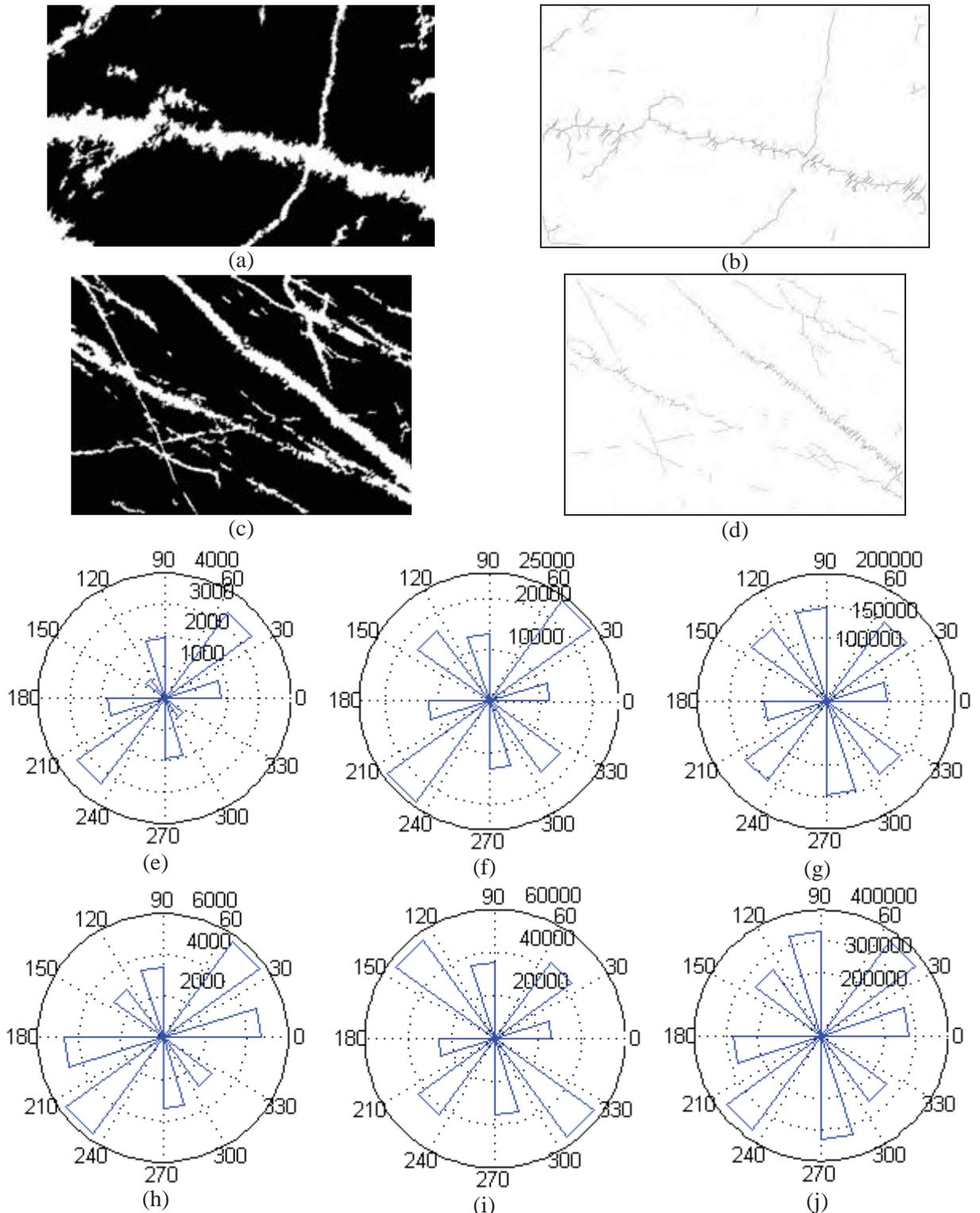
#### 4.3.2.2 Análise das direções calculadas

As Figuras 98 e 99 mostram discordâncias entre as direções preponderantes dos rastros obtidas pelos diferentes métodos para as imagens MOC E10-02468 e E1400400 (Figura 98) e para as HiRISE ESP\_013520\_1180 e ESP\_013991\_1160 (Figura 99). As falhas ocorridas no método que emprega a granulometria ocorrem principalmente por causa do esqueleto. Se os rastros fossem feições de largura constante e pouca ou nenhuma variação em suas bordas, o esqueleto seria bastante fiel à direção de cada componente da imagem. Entretanto, variações de espessura e/ou de borda produzem segmentos de esqueletos cujas direções diferem muito da direção principal dos componentes a que pertencem. Exemplo claro desse tipo de distorção pode ser visto no esqueleto mostrado na Figura 98(d). A direção preponderante dos rastros é de 90° (N-S) e, no entanto, ao se utilizar a granulometria sobre o esqueleto das feições para se definir a direção o resultado foi 45° (NE-SW), como se percebe pela análise da rosa de direções inserida na Figura 98(i). O mesmo tipo de problema acontece com as imagens mostradas nas Figuras 99(a, c). As direções preponderantes nestas imagens são claramente 0° (E-W) e 135° (NW-SE), respectivamente. Porém, os esqueletos dos rastros

(Figuras 99(b, d)) possuem diversos segmentos orientados na direção  $45^\circ$  (e é esta a direção predominante de acordo com as rosas de direções nas Figuras 99(e, h)).



**Figura 98:** Diferentes direções obtidas para as imagens MOC E10-02468 e E14-00400: (a) rastros detectados na imagem E10-02468; (b) esqueleto dos rastros detectados na imagem E10-02468 (cor invertida); (e-g) rosa de direções obtidas pela granulometria ( $45^\circ$ ), gradiente ( $45^\circ$ ) e abertura direcional ( $0^\circ$ ), respectivamente, para a imagem E10-02468; (c) rastros detectados na imagem E14-00400; (d) esqueleto dos rastros detectados na imagem E14-00400 (cor invertida); (h-j) rosa de direções obtidas pela granulometria ( $90^\circ$ ), gradiente ( $45^\circ$ ) e abertura direcional ( $90^\circ$ ), respectivamente, para a imagem E14-00400.



**Figura 99:** Diferentes direções obtidas para as imagens HiRISE ESP\_013520\_1180 e ESP\_013991\_1160: (a) rastros detectados na imagem ESP\_013520\_1180; (b) esqueleto dos rastros detectados na imagem ESP\_013520\_1180 (cor invertida); (e-g) rosa de direções obtidas pela granulometria ( $45^\circ$ ), gradiente ( $45^\circ$ ) e abertura direcional ( $0^\circ$ ), respectivamente, para a imagem ESP\_013520\_1180; (c) rastros detectados na imagem ESP\_013991\_1160; (d) esqueleto dos rastros detectados na imagem ESP\_013991\_1160 (cor invertida); (h-j) rosa de direções obtidas pela granulometria ( $45^\circ$ ), gradiente ( $135^\circ$ ) e abertura direcional ( $135^\circ$ ), respectivamente, para a imagem ESP\_013991\_1160.

Se os conjuntos binários, em vez de esqueletos, fossem considerados nesta análise, a granulometria não seria sensível o bastante para diferenciar as direções justamente por causa da largura dos componentes. No caso da definição das direções com base na direção do gradiente, distorções ocorrem principalmente por causa de variações nas bordas dos rastros. Este tipo de falha pode ser bem compreendido ao se analisar a imagem mostrada na Figura 99(a). O maior componente da imagem está orientado a  $0^\circ$  (E-W), mas as bordas deste rastro são extremamente irregulares. Elas exibem inúmeras reentrâncias orientadas na direção  $45^\circ$  (NE-SW) que provocam a falha do método (note que a rosa de direções correspondente, mostrada na Figura 99(f) indica a direção preponderante de  $45^\circ$ ). As aberturas direcionais são menos sensíveis a estes tipos de distorção e nos exemplos citados, como se percebe da análise das rosas de direções das imagens, mostradas nas Figuras 98(g, j) (para as imagens MOC) e nas Figuras 99(g, j) (para as imagens HiRISE), acertam na definição da direção predominante dos rastros: E-W para a imagem E10-02468, N-S para a imagem E1400400, E-W para a imagem ESP\_013520\_1180 e NW-SE para a imagem ESP\_013991\_1160.

As Tabelas 25 e 26 mostram as direções preponderantes calculadas (utilizando o método III) para os rastros nas imagens das Figuras 75 (imagens processadas) e 84 (*ground truth*), respectivamente.

Tabela 25: Direções calculadas a partir das imagens processadas mostradas na Figura 75.

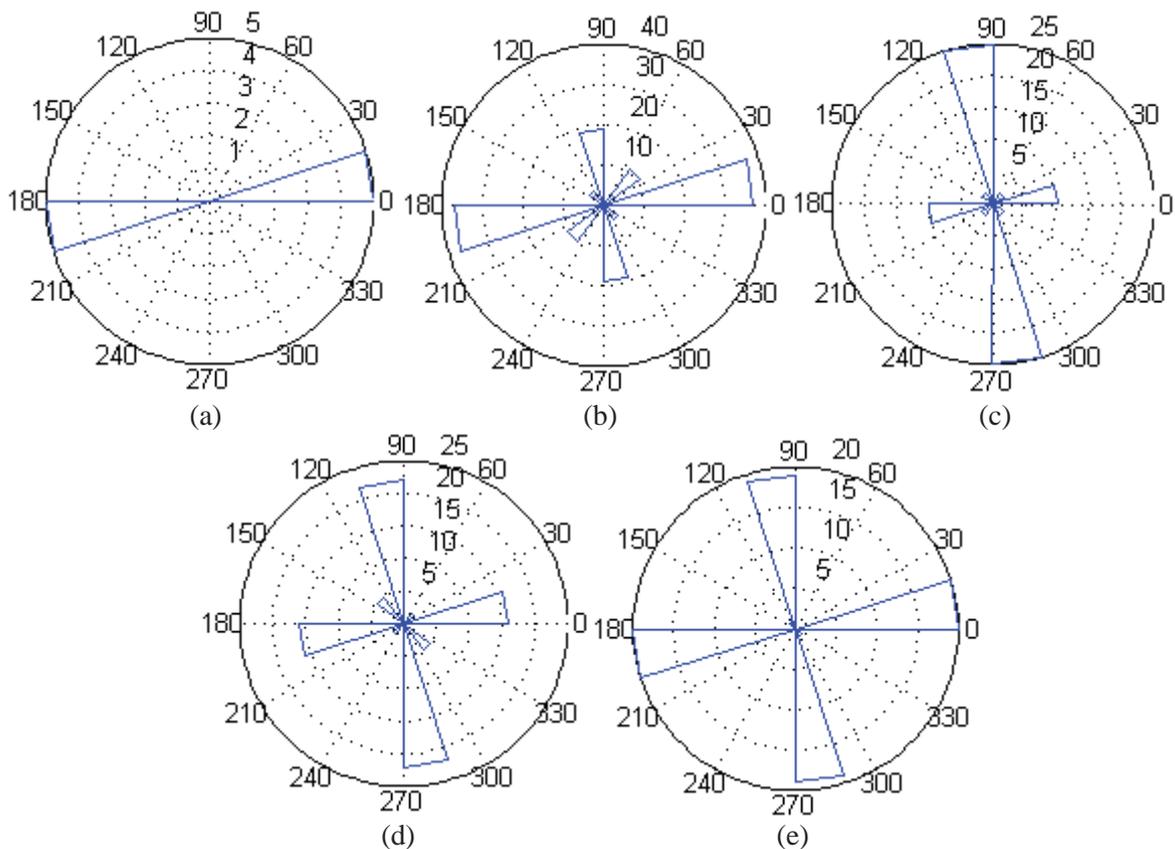
Nome	Direção
PSP_006163_1345B(a)	NE-SW
PSP_005780_1215(b)	N-S
PSP_002548_1255A(c)	N-S
PSP_004249_1255(d)	N-S
M10-01206(e)	N-S
E11-00582(f)	NE-SW
E10-04027(g)	N-S
R13-01467(h)	E-W

Tabela 26: Direções calculadas a partir do *ground truth* mostrado na Figura 84.

Nome	Direções
PSP_006163_1345B(a)	NE-SW
PSP_005780_1215(b)	N-S
PSP_002548_1255A(c)	N-S
PSP_004249_1255(d)	N-S
M10-01206(e)	N-S
E11-00582(f)	NE-SW
E10-04027(g)	N-S
R13-01467(h)	NW-SE

As direções calculadas para as imagens PSP\_006163\_1345B, PSP\_005780\_1215, PSP\_002548\_1255A, PSP\_004249\_1255, M10-01206, E11-00582 e E10-04027 a partir das imagens processadas para detecção dos rastros foram idênticas às calculadas a partir do *ground truth*. A única exceção foi a imagem R13-01467 para a qual as direções diferem em  $45^\circ$  (diferença entre as direções E-W e NW-SE). A diferença foi causada pela baixa acurácia na detecção dos rastros nesta imagem.

A Figura 100 mostra as rosas de direções para as regiões Aeolis, Argyre, Noachis, Eridania e Hellas. Os círculos concêntricos indicam a frequência com que cada uma das direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$  ocorre em cada região.



**Figura 100:** Rosas de direções para Aeolis (a), Argyre (b), Noachis (c), Eridania (d) e Hellas (e).

#### 4.3.2.3 Verificação das projeções

As direções foram medidas para todas as cenas do banco de imagens. Como se nota pelo Apêndice, todas as imagens HiRISE foram georreferenciadas no sistema de projeção Equirretangular. As coordenadas de parte das imagens MOC foram definidas no

sistema Sinusoidal, porém, há uma grande quantidade delas sem projeção. Para que as medidas de direção sejam confiáveis é preciso certificar-se de que a orientação, projeção e distorções geométricas das cenas não influenciem os resultados. As imagens MOC sem projeção foram tomadas segundo o azimute de  $90^\circ$ . As distorções geométricas dessas imagens são causadas principalmente pela perspectiva central do imageamento de cada linha, ou bloco de linhas, da cena (algo característico dos sensores *pushbroom*). No caso das imagens com projeção cartográfica, nenhuma delas é projeção conforme, isto é, não preservam relações angulares. Em outras palavras, se dois rastros se cruzam em ângulo reto no terreno marciano, na imagem projetada o ângulo entre eles será diferente de  $90^\circ$ . A distorção angular causada pelas projeções cartográficas pode ser mensurada a partir das equações das projeções. De acordo com Snyder (1926), para a projeção Sinusoidal as coordenadas  $(x, y)$ , as escalas  $h$  e  $k$  ao longo dos meridianos e paralelos e a deformação angular máxima  $w$  num determinado ponto  $(\varphi, \lambda)$  são calculadas como:

$$\begin{aligned}
 x &= R(\lambda - \lambda_0) \cos \varphi \\
 y &= R\varphi \\
 h &= [1 + (\lambda - \lambda_0)^2 \sin^2 \varphi]^{1/2} \\
 k &= 1 \\
 \sin(w/2) &= |k - h| / (k + h).
 \end{aligned}
 \tag{79}$$

Em que  $\lambda_0$  é a longitude do meridiano central da projeção e  $R$  é o raio da superfície de referência.

As quantidades calculadas pelo conjunto de equações em (82) baseiam-se numa superfície de referência esférica. Os erros provocados por esta simplificação são insignificantes já que o *achatamento* de Marte é muito pequeno ( $\sim 0,006$ ). A distorção angular pode ser calculada em vários pontos de maneira a formar uma superfície de distorção. O tamanho dessa superfície foi definido de acordo com a maior largura (39.910 pixels) e maior comprimento (126.617) das imagens no banco de dados, antes do recorte das regiões de interesse. A largura e o comprimento em pixels foram multiplicados pela pior resolução espacial (11,57 m) entre as imagens. Assim obteve-se a largura de 461,7587 km e comprimento de 1464,9587 km para a superfície de distorção. As distâncias angulares para a largura e comprimento foram calculadas como:

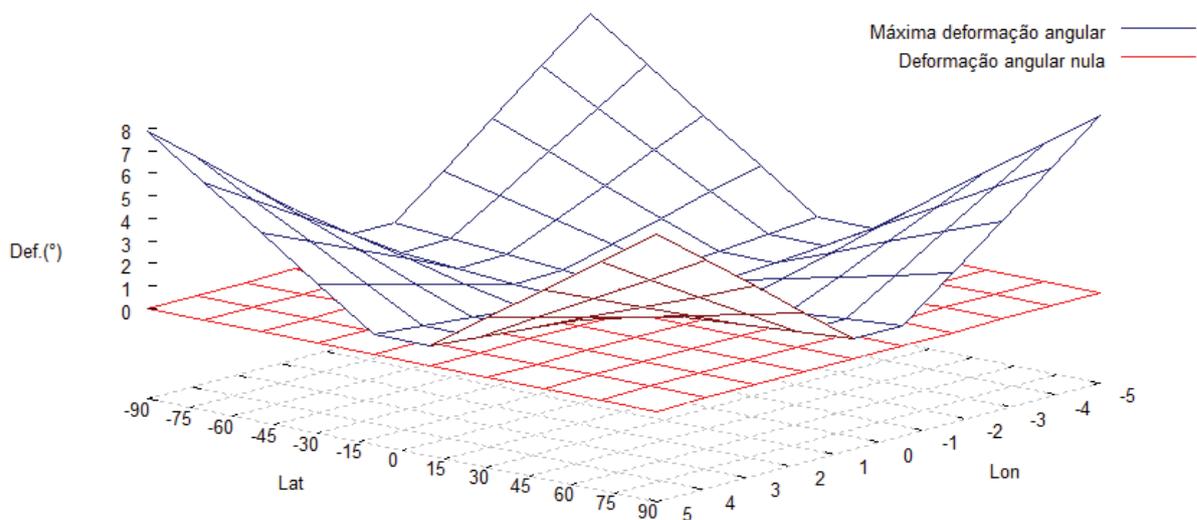
$$\alpha_{rad} = l / R. \quad (80)$$

Em que  $l$  = largura/comprimento (em km);  $R$  = raio médio de Marte (3.397 km).

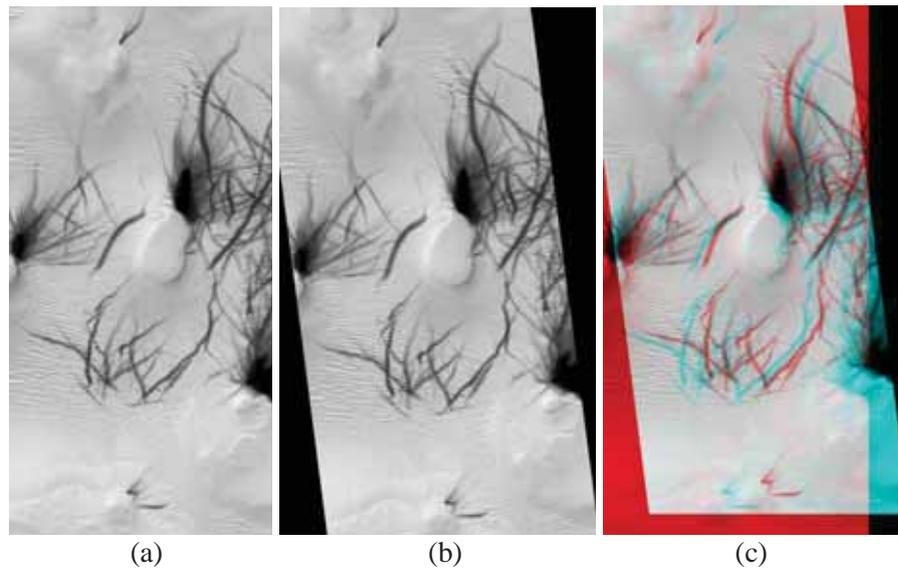
Os valores obtidos foram  $\sim 8^\circ$  para largura e  $\sim 25^\circ$  para comprimento. Na projeção Sinusoidal o meridiano central está sempre na cena, entretanto nenhuma informação sobre o paralelo padrão é fornecida pelo *Malin Space Science Systems*. Portanto, para os cálculos, o paralelo padrão foi adotado como sendo o equador ( $\varphi_0 = 0^\circ$ ). Como a maior latitude entre as imagens do banco foi de aproximadamente  $60^\circ$  (centro da cena), a distorção foi calculada até  $\varphi = \pm 90^\circ$ . A Figura 101 mostra a superfície de distorção angular para a projeção Sinusoidal. A distorção máxima, no pior dos casos, não ultrapassa  $8^\circ$ . A Figura 102 mostra a sobreposição entre as versões projetada (Sinusoidal) e sem projeção da imagem MOC E14-00400A, cujas coordenadas do centro são  $\varphi = 47,18^\circ$  S,  $\lambda = 318,16^\circ$  E.

O mesmo procedimento foi adotado para construir a superfície de deformação angular para projeção Equirretangular. As equações da projeção, também de acordo com Snyder (1926), são:

$$\begin{aligned} y &= R\varphi \\ h &= 1 \\ k &= \cos \varphi_0 / \cos \varphi \\ \sin(w/2) &= |k - h| / (k + h). \end{aligned} \quad (81)$$

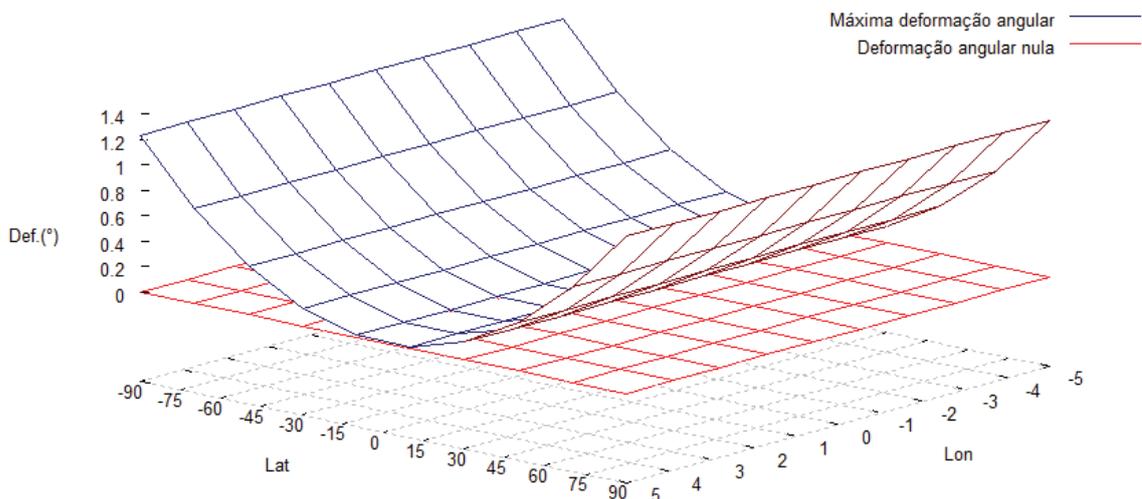


**Figura 101:** Superfície de distorção angular para projeção Sinusoidal.



**Figura 102:** Efeito da projeção Sinusoidal sobre imagem MOC: (a) imagem sem projeção; (b) imagem projetada; (c) sobreposição das imagens.

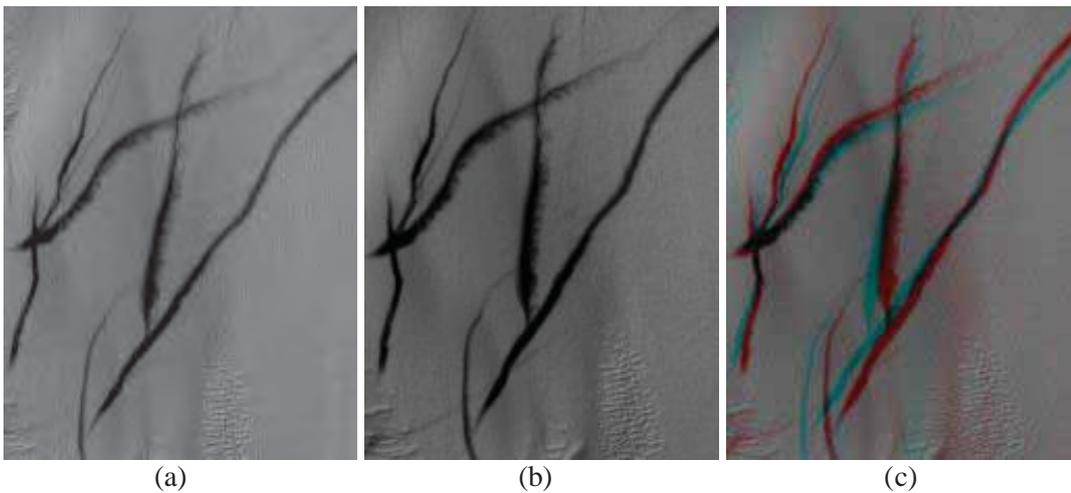
O paralelo padrão  $\varphi_0$  foi adotado como o equador. A superfície de distorção é mostrada na Figura 103. A distorção angular máxima é menor que  $1,4^\circ$ . O efeito da projeção para a imagem PSP\_006163\_1345A, com coordenadas do centro  $\varphi = 45,3^\circ$  S e  $\lambda = 316,3^\circ$  E, é ilustrado na Figura 104.



**Figura 103:** Superfície de distorção angular para projeção Equirretangular.

As distorções angulares máximas de  $8^\circ$  e  $1,4^\circ$  para as projeções Sinusoidal e Equirretangular ocorrem nos casos extremos. A imagem mais ao Sul do banco de dados tem latitude  $60^\circ$  S, onde as deformações são menores, e as dimensões máximas das cenas, após os

recortes em regiões de interesse, são 9.058 pixels de largura versus 7.526 pixels de comprimento. As direções medidas para os rastros variam em 45° (0°, 45°, 90° e 135°), portanto as distorções causadas pelas projeções não conformes não são significativas para as medidas. A conclusão é suportada pela análise visual das imagens nas Figuras 102(c) e 104(c). Nelas, os rastros das imagens sem projeção são representados em vermelho e os rastros das imagens projetadas em ciano. A diferença na direção dos rastros, nos dois casos, é insignificante.



**Figura 104:** Efeito da projeção Sinusoidal sobre imagem HiRISE: (a) imagem sem projeção; (b) imagem projetada; (c) sobreposição das imagens.

#### 4.3.2.4 Comparação das direções calculadas com a literatura e com o GCM

Uma vez descartada a hipótese de que a projeção das imagens poderia causar erros de interpretação das direções dos rastros, estes dados, oriundos do processamento das imagens, podem ser comparados com informações de outros autores sobre o comportamento dos *dust devils* e também com simulações do GCM.

Fenton et al. (2005) observaram dunas e *ripples* na cratera *Proctor*, na região de Noachis, formados por ventos nas direções ENE-WSW, rastros de *dust devils* nas direções ENE-WSW, NE-SW e NW-SE, bem como rochas erodidas por ventos nas direções ENE-WSW. Os dados contrastam com a Figura 100(c), segundo a qual *dust devils* se movem predominantemente na direção N-S em Noachis. Balme et al. (2003) ao analisarem imagens da região de Argyre encontraram marcas escuras causadas por desmoronamentos de areia em dunas na direção ENE-WSW e ao observarem imagens da região de Hellas relataram a

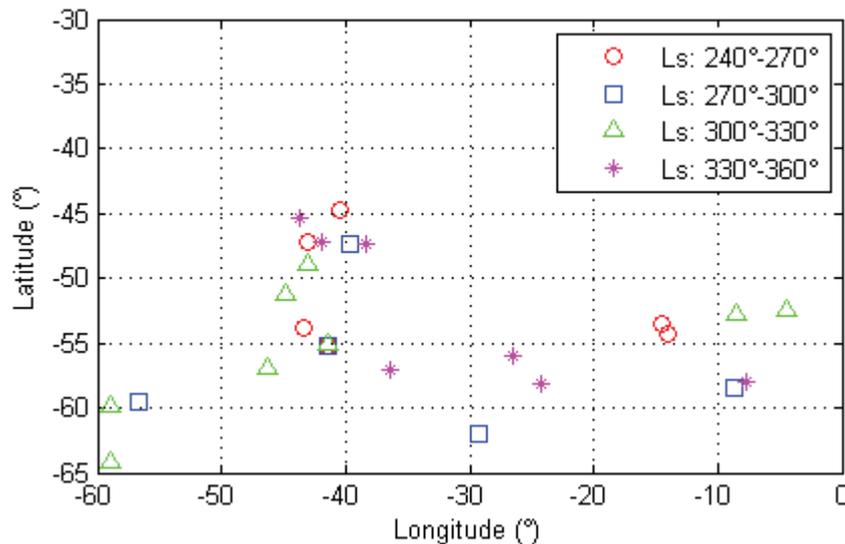
existência de rastros de *dust devils* na direção NW-SE. As informações diferem daquelas apresentadas na Figura 100. A direção predominante determinada automaticamente para Argyre foi E-W (Figura 100(b)) e, para Hellas (Figura 100(e)), foram encontradas duas direções preferenciais: E-W e N-S. Drake et al. (2006) observaram rastros de *dust devils* e marcas deixadas por desmoronamentos de areia em dunas entre as latitudes 65° N e 72° N. Os autores relataram ventos nas direções NW-SE (entre as longitudes 250° E e 270° E), N-S, E-W, NE-SW (120° E a 140° E) e WNW-ESE (65° E a 85° E). A Figura 100(a) mostra que o deslocamento dos *dust devils* foi predominante na direção E-W para Aeolis e em Eridania (Figura 100(d)) o vento foi preponderante na direção N-S com alguns rastros também na direção E-W. Em suma, as direções inferidas pelo método de detecção automática concordam com o padrão geral de comportamento dos ventos N-S e E-W previsto pelo GCM, de acordo com simulações feitas por Greeley et al. (1992).

As direções calculadas para Argyre foram comparadas com as direções simuladas pelo GCM. Os dados utilizados para comparação com o trabalho foram gerados a partir do *Mars Climate Database* (MCD), cuja versão online está disponível em <http://www-mars.lmd.jussieu.fr/>, último acesso em out. 2011. O MCD foi desenvolvido pelo *Laboratoire de Météorologie Dynamique* (LMD, Paris), pelo *Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics group* (AOPP, Oxford), pelo *Department of Physics and Astronomy (The Open University)*, e pelo *Instituto de Astrofísica de Andalucía* (IAA, Granada) com apoio da *European Space Agency* (ESA) e do *Centre National d'Etudes Spatiales*. Trata-se de um banco de dados atmosféricos compilados a partir de simulações numéricas do Modelo de Circulação Geral da atmosfera marciana (FORGET et al., 1999; LEWIS et al., 1999). Ao se fazer simulações com o MCD, 4 cenários em que há variabilidade de conteúdo de poeira em suspensão estão disponíveis. São eles:

- **Cenário Anual:** Cenário construído para simular o comportamento atmosférico ao longo de um ano marciano, conforme observações feitas pela *Mars Global Surveyor*. Este cenário não considera tempestades de areia globais;
- **Cenário Frio:** Corresponde a uma atmosfera extremamente limpa, com baixa concentração de poeira;
- **Cenário Quente:** Corresponde a uma atmosfera opaca, com alta concentração de poeira; e
- **Cenário Tempestade de Areia:** Representa Marte durante uma tempestade global de areia.

As simulações feitas consideram o Cenário Anual com fluxo solar incidente médio (outras opções seriam fluxo solar máximo e mínimo). A base de dados é dividida por meses marcianos (variações de  $30^\circ$  em longitude solar Ls). Para estabelecer a espessura da camada atmosférica considerada há três opções: Altitude sobre o Areóide (Geóide marciano), Altitude sobre a superfície local e valores de pressão. As simulações apresentadas aqui foram feitas com base na altitude sobre a superfície local. A espessura da atmosfera foi fixada em 10 km por ser este o comprimento máximo de *dust devils* observados. A hora local foi fixada em 14:00:00h.

As Figuras 108 a 115 mostram as simulações das componentes *zonal* (sentido E-W) e *meridiana* (sentido N-S) dos ventos para a região de Argyre ao longo das longitudes solares Ls =  $240^\circ$  a Ls =  $360^\circ$ . A Figura 105 mostra a disposição das imagens processadas daquela região (foram consideradas apenas as coordenadas dos centros das cenas antes dos recortes) de acordo com suas longitudes solares.



**Figura 105:** Disposição das imagens processadas da região de Argyre de acordo com suas longitudes solares. As coordenadas são dos centros das cenas originais, antes de serem recortadas.

As Figuras 106 e 107 mostram, respectivamente, as frequências das direções dos rastros separadas por longitude solar em Argyre e o total de frequências das direções dos rastros durante a primavera e verão. Os dados da terceira (Dir. Norte) e quarta (Dir. Leste) colunas da Tabela 27 foram definidos a partir da comparação entre as posições das imagens na Figura 105 e os valores de velocidade dos ventos previstos pelo MCD nas Figuras 108 a 115. Nestas, os círculos brancos sólidos assinalam as posições dos centros das imagens de

Argyre. Os valores de velocidade da Tabela 27 são aqueles considerados predominantes entre as imagens, a partir da análise visual.

Tabela 27: Direção dos ventos predita pelo GCM e direção dos rastros calculada para Argyre.

Long. Solar (°)	Nº de imagens	N-S (m×s <sup>-1</sup> )	E-W (m×s <sup>-1</sup> )	Dir. predominante calculada	Acurácia (%)
240-270	7	-3	-5	E-W	91,61 ± 4,12
270-300	7	-7	-12	E-W	94,70 ± 2,32
300-330	15	4	6	E-W	92,21 ± 4,41
330-360	42	7	17	E-W	93,65 ± 4,44

A quinta coluna da Tabela 27 é composta pelas direções dos rastros calculadas pelo método automático proposto. Em geral, as velocidades dos ventos se mostraram maiores na componente zonal e concordaram com as direções calculadas para os rastros (E-W). É interessante perceber que conforme a longitude solar aumenta, o comportamento dos ventos na região torna-se acentuadamente zonal.

Analisando a Tabela 27 as maiores velocidades dos ventos preditas pelo GCM entre as longitudes solares de 240° e 360° ocorrem na componente zonal. É razoável assumir, portanto, que a direção preponderante dos ventos na região de Argyre seja E-W. As direções predominantes dos rastros de *dust devils* calculadas automaticamente concordam com as direções de maior velocidade dos ventos.

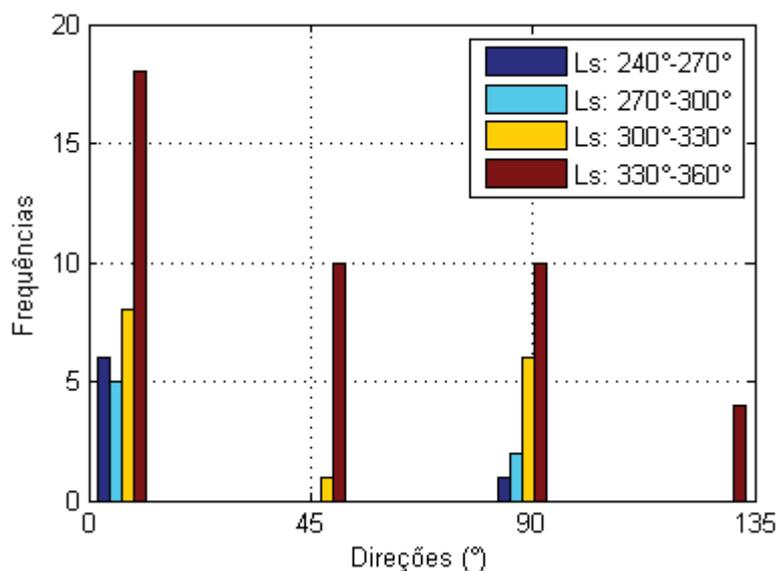


Figura 106: Frequências das direções dos rastros separadas por longitude solar em Argyre.

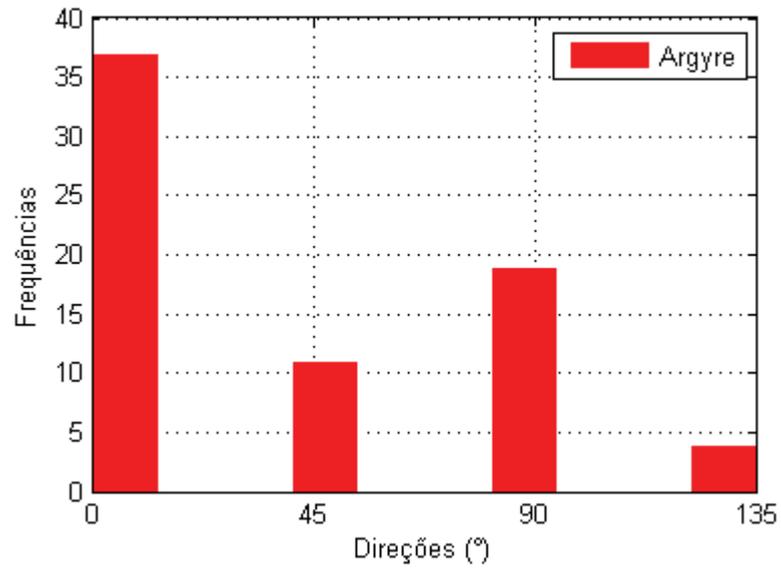


Figura 107: Frequências das direções dos rastros na região de Argyre durante a primavera e verão.

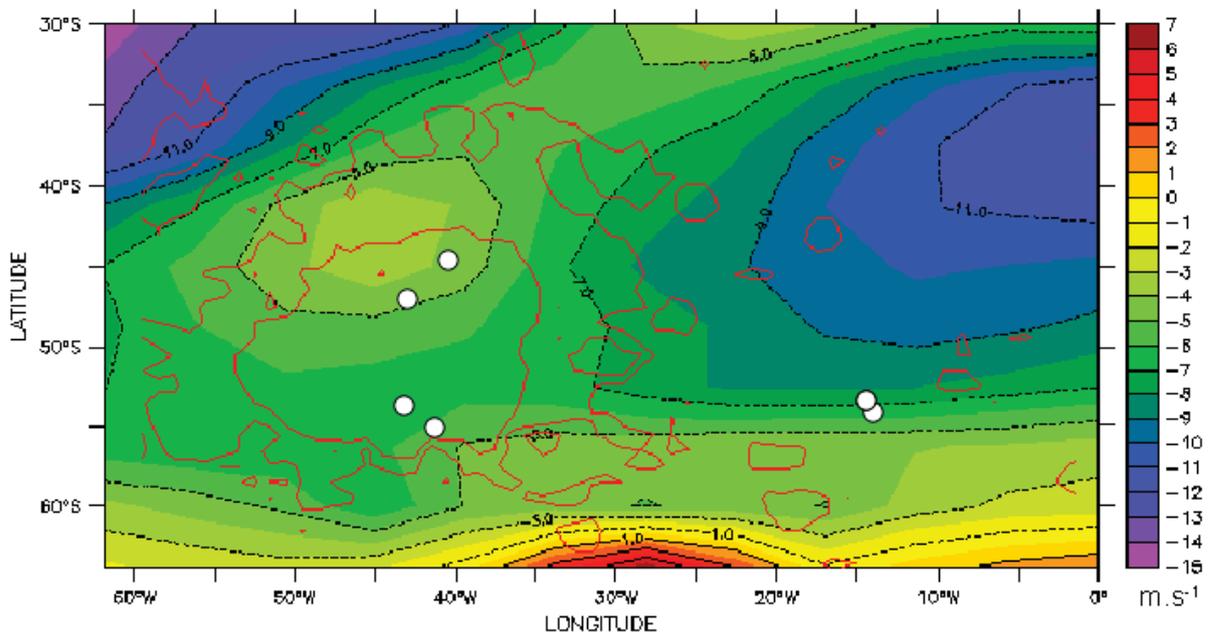


Figura 108: Componente zonal dos ventos em Argyre durante Ls: 240°-270°.

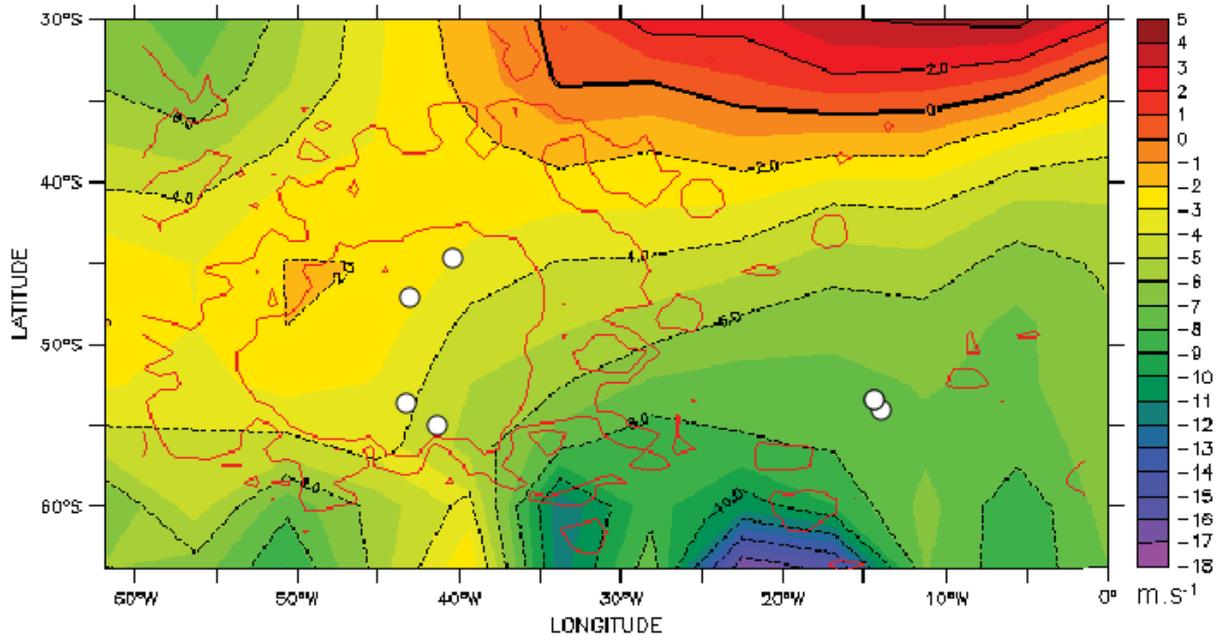


Figura 109: Componente meridional dos ventos em Argire durante Ls: 240°-270°.

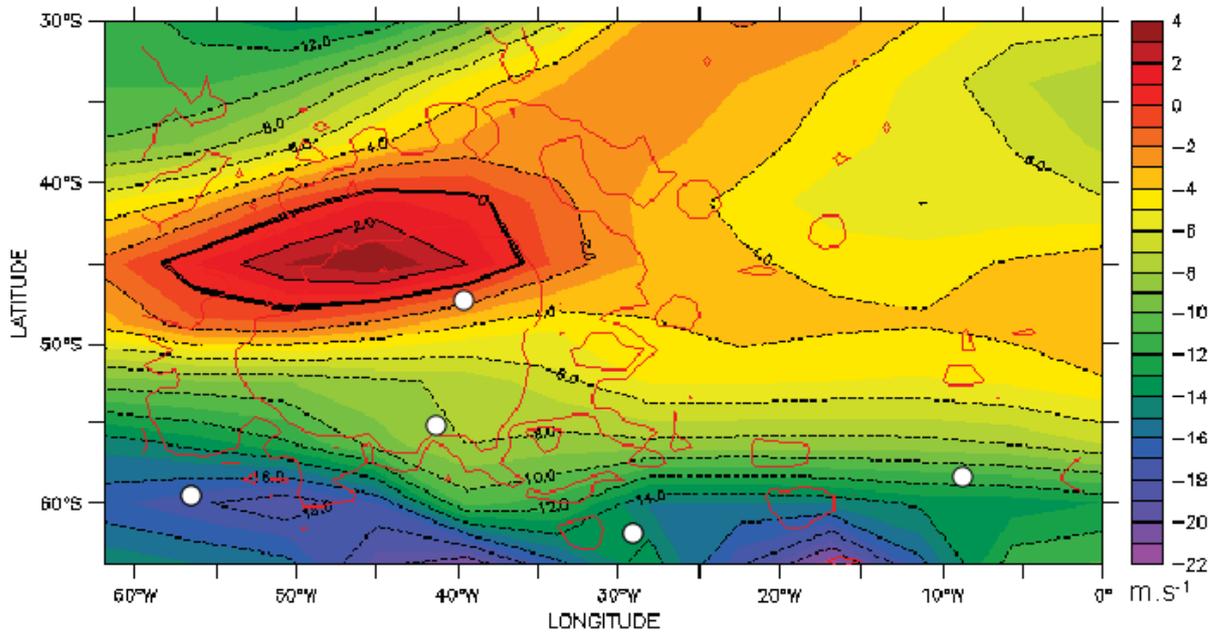


Figura 110: Componente zonal dos ventos em Argire durante Ls: 270°-300°.

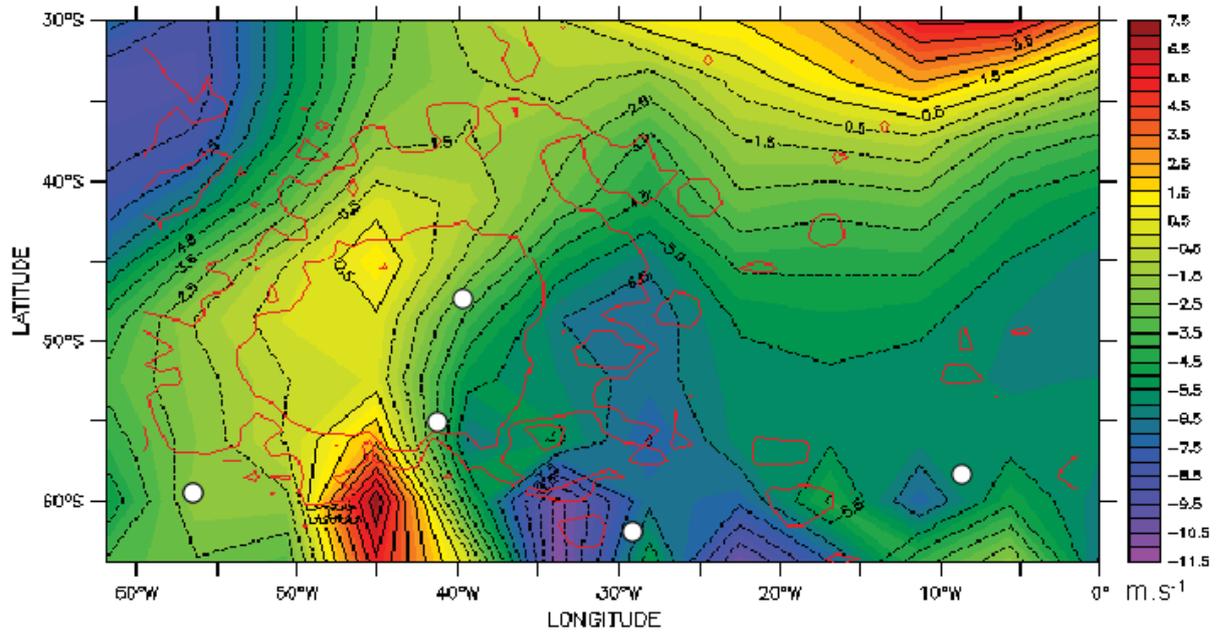


Figura 111: Componente meridional dos ventos em Argire durante Ls: 270°-300°.

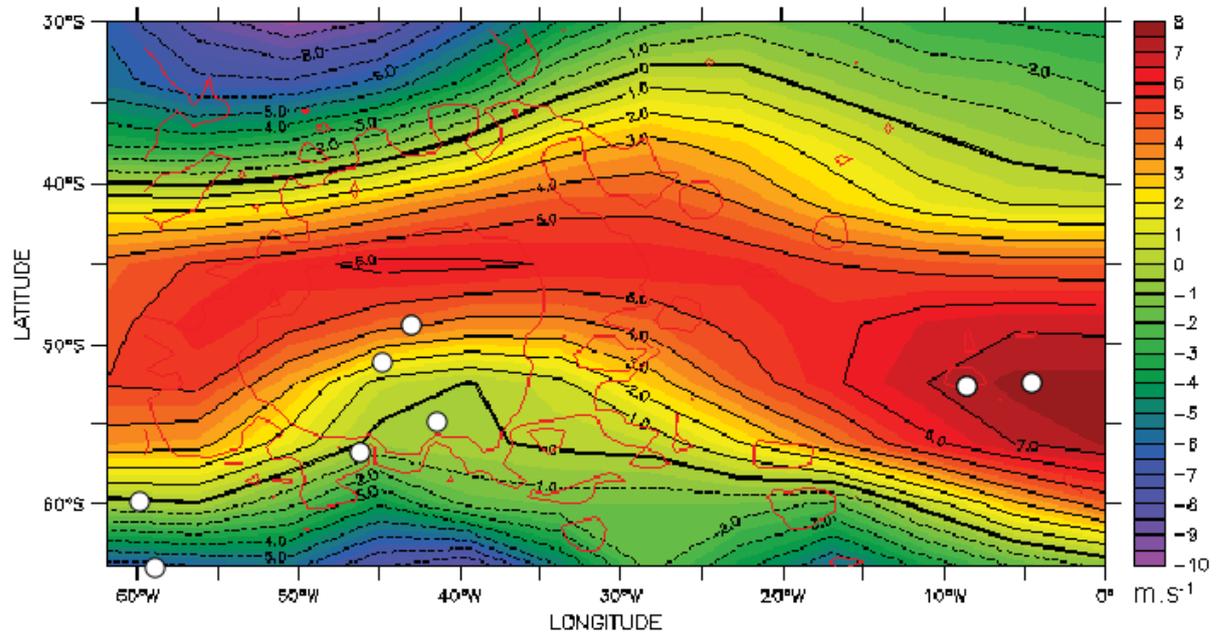


Figura 112: Componente zonal dos ventos em Argire durante Ls: 300°-330°.

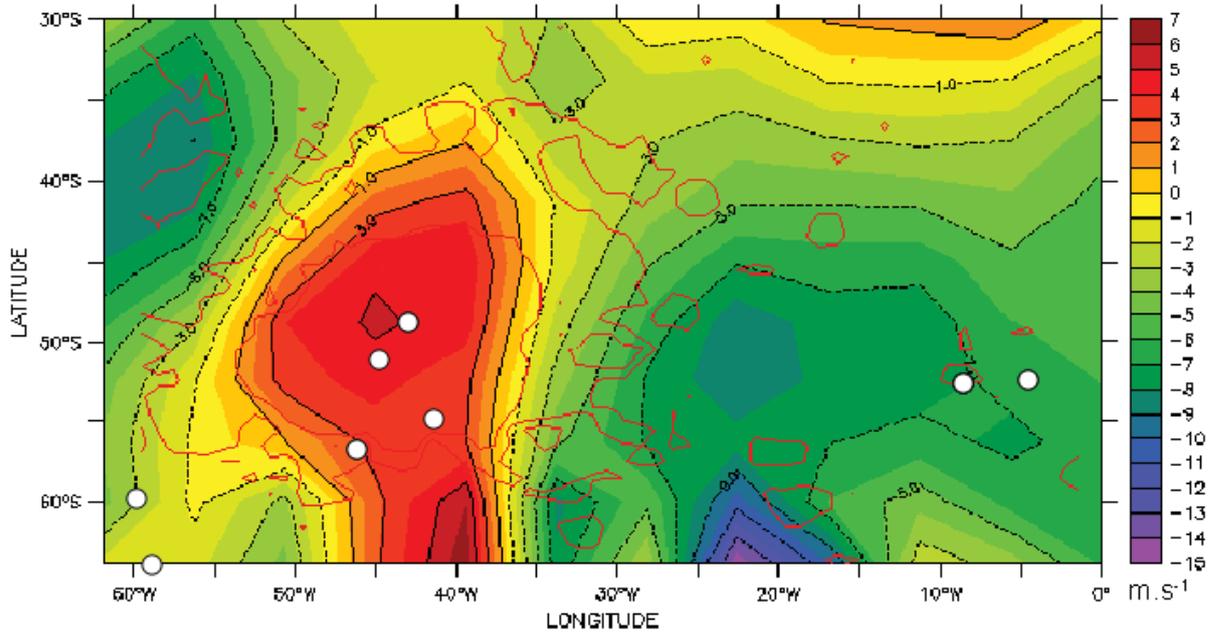


Figura 113: Componente meridional dos ventos em Argire durante Ls: 300°-330°.

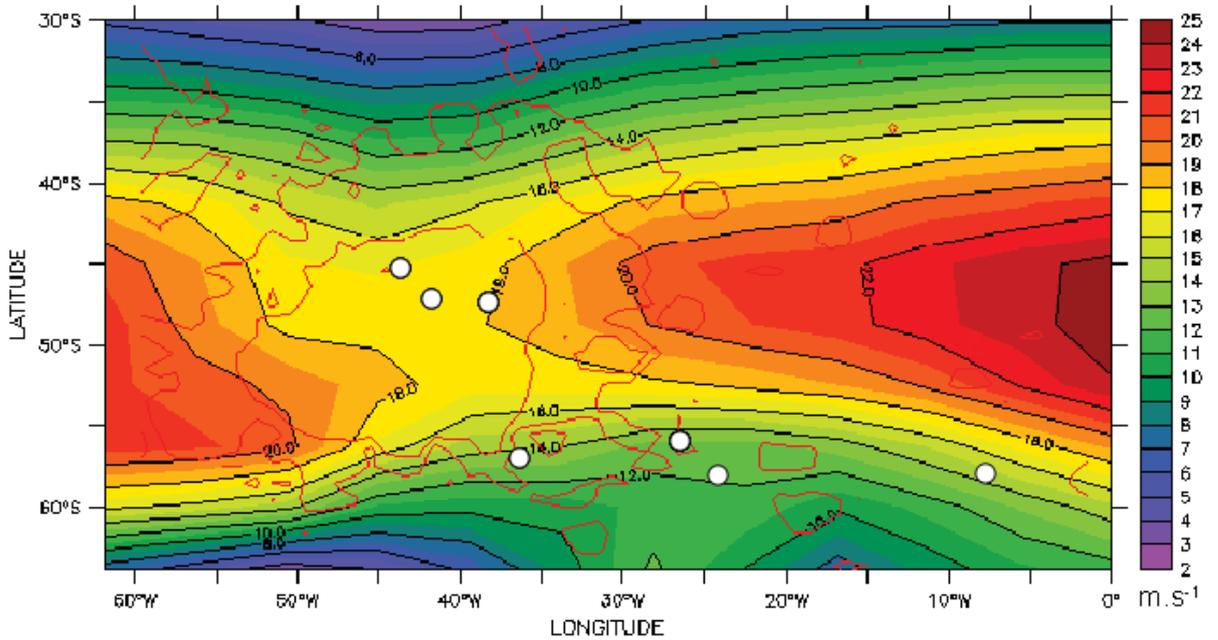
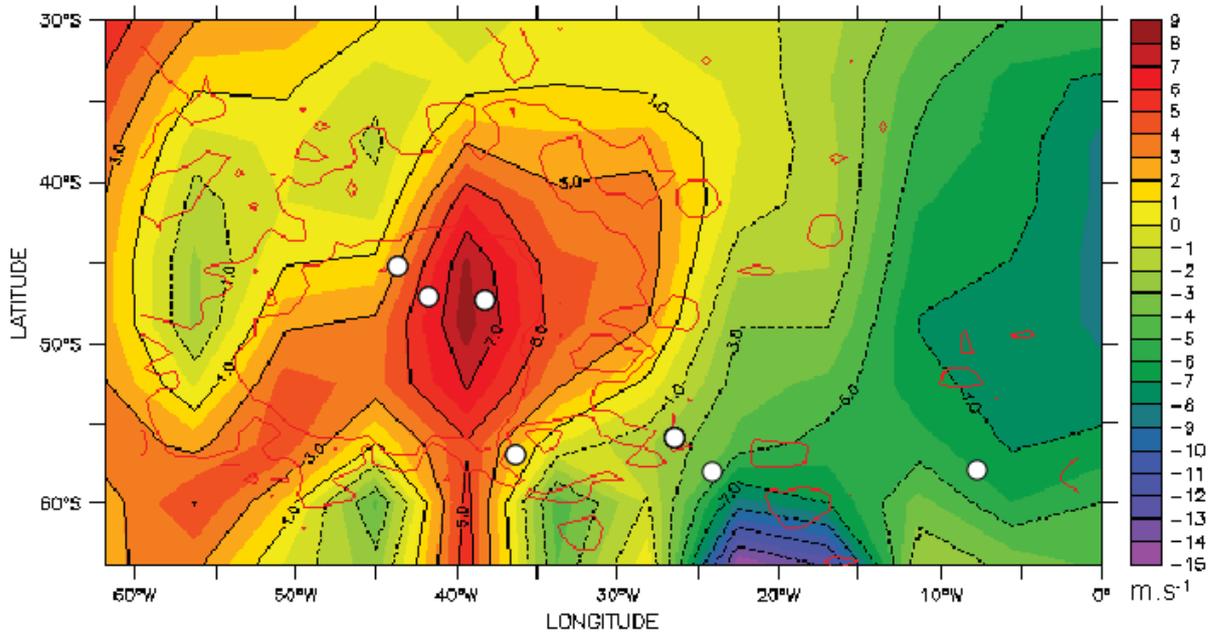


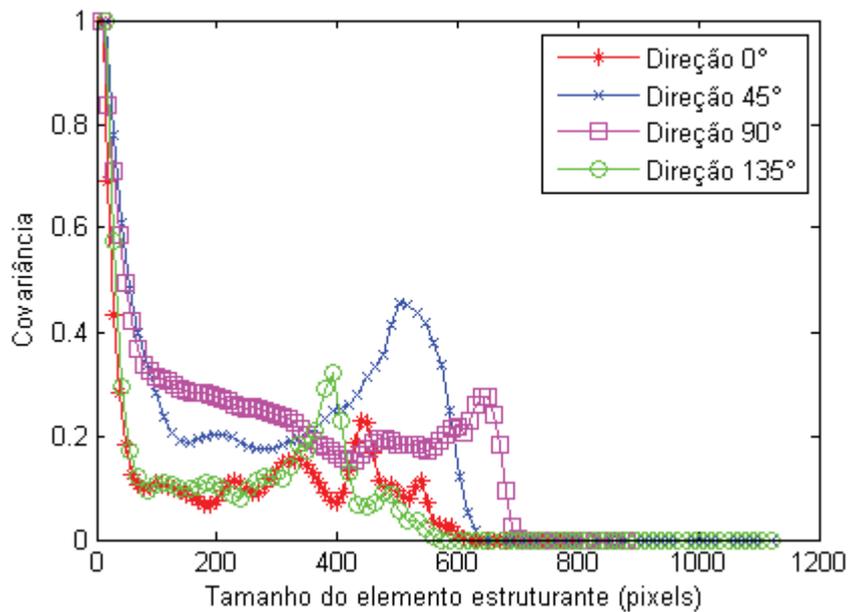
Figura 114: Componente zonal dos ventos em Argire durante Ls: 330°-360°.



**Figura 115:** Componente meridional dos ventos em Argire durante Ls: 330°-360°.

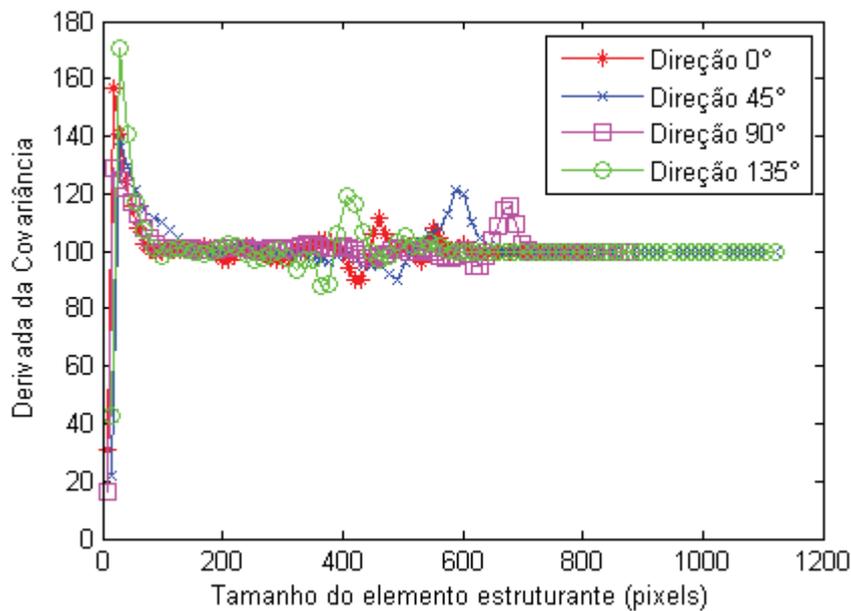
### 4.3.3 Cálculo de covariância

A utilidade da covariância para ajudar a caracterização dos rastros de *dust devils*, embora não tenha sido explorada exhaustivamente neste trabalho, é exemplificada para uma imagem HiRISE. A Figura 116 mostra as curvas de covariância morfológica nas direções 0°, 45°, 90° e 135°, calculadas para a imagem PSP\_006163\_1345A (Figura 104).



**Figura 116:** Covariâncias morfológicas para a imagem PSP\_006163\_1345A nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.

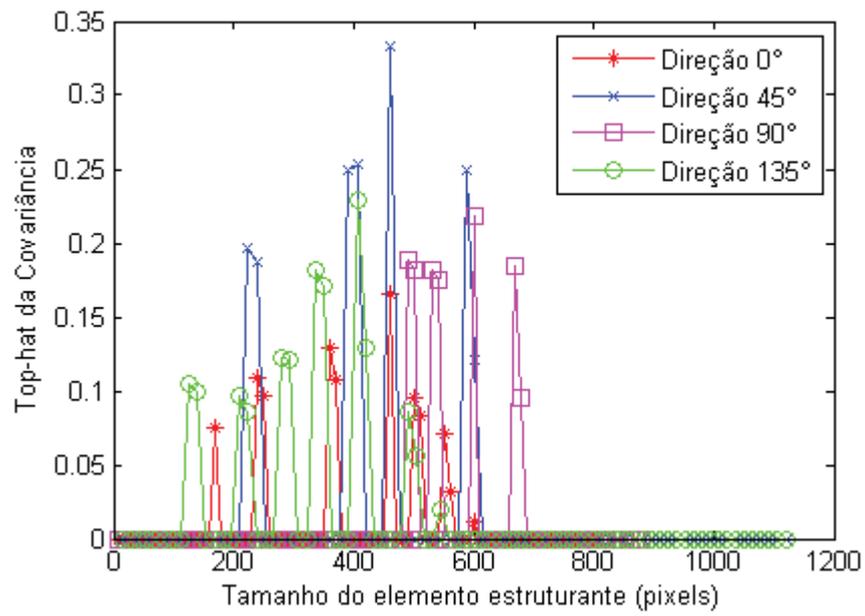
Analisando-se a Figura 116 percebe-se que a maior covariância ( $Cov = 0,45$ ) ocorreu na direção  $45^\circ$ . Pode-se assumir que as estruturas da imagem se correlacionam mais fortemente nesta direção que nas demais. A periodicidade das estruturas pode ser calculada com base na quantidade de picos nas curvas de covariância. A Figura 117 mostra as derivadas das curvas. Nela os valores de covariância na ordenada do gráfico tiveram sua escala alterada para evitar números negativos.



**Figura 117:** Derivadas das covariâncias morfológicas para a imagem PSP\_006163\_1345A nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ .

Após aplicar um *top-hat* os picos são extraídos e contados. A Figura 118 mostra os picos das curvas de covariância nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ . O primeiro pico, causado pela coincidência exata entre as estruturas antes das translações, foi desconsiderado. A periodicidade é maior na direção  $0^\circ$ , na qual a quantidade de picos da curva é maior.

Tais informações podem ser usadas isoladamente ou em conjunto com outras quantidades, como largura média e direção dos rastros, área coberta por rastros, contraste relativo entre rastros e vizinhança, inclinação da tangente à origem da covariância e inclinação da reta assíntota, dentre outros, para melhor entender o fenômeno *dust devil*.



**Figura 118:** Picos das covariâncias morfológicas para a imagem PSP\_006163\_1345A nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.

---

Capítulo 5

**CONCLUSÃO**

---

## 5.1 Considerações finais e recomendações

Este trabalho teve como objetivo geral dar uma contribuição para a automação de processos de detecção de feições em imagens digitais. Especificamente, tal contribuição foi concretizada com a criação de um método para detecção automática de rastros escuros de *dust devils* em imagens advindas do sensoriamento remoto de Marte. Entender a atividade eólica, as variações de temperatura, a formação geológica e fazer o mapeamento de áreas de risco de Marte é essencial não apenas para que missões tripuladas possam ser planejadas e enviadas àquele planeta, mas também porque no passado Marte possuía uma atmosfera mais densa e um clima mais quente, muito parecidos com a atmosfera e clima da Terra. Portanto, conhecer as causas que levaram Marte a se tornar um planeta tão inóspito, com condições climáticas tão agressivas e diferentes das da Terra, poderá ajudar a humanidade a compreender as mudanças pelas quais nosso planeta tem passado e a prever sua evolução.

Nos últimos 15 anos a comunidade científica aumentou fortemente seu interesse na exploração de Marte e o resultado relativamente recente disso foi o envio ao planeta de duas sondas que ajudaram a fazer um mapeamento bastante completo e detalhado dele. Estas duas sondas, nomeadas *Mars Global Surveyor* (MGS) e *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) levaram consigo as câmeras de alta resolução *Mars Orbiter Camera* (MOC) e *High Resolution Imaging Science Experiment* (HiRISE), que adquiriram as imagens utilizadas nesta tese. A busca por imagens contendo rastros escuros de *dust devils* foi norteada por evidências (BALME et al., 2003; FENTON et al., 2005; ÖRMO e KOMATSU, 2003; WHELLEY e GREELEY, 2008) de que a formação dos vórtices é mais frequente no hemisfério Sul e que a maioria deles ocorre durante a primavera e verão marcianos. Foram consultados intensamente os bancos de imagens da empresa *Malin Space Science Systems* (responsável pela câmera MOC) e da Universidade do Arizona (responsável pela câmera HiRISE). Cerca de 1.000 imagens nas regiões de Aeolis, Argyre, Noachis, Eridania e Hellas foram pesquisadas e rastros foram encontrados em 124 delas (Figura 59).

A resposta espectral dos rastros varia significativamente de cena para cena, bem como a topografia das regiões. Nas 124 imagens está representada, tanto quanto possível, a grande variação de brilho dos rastros.

A fim de diminuir o tempo de processamento (especialmente por causa do tamanho das imagens HiRISE) e descartar informação irrelevante (como grandes áreas sem

rastros ou qualquer outra feição geomorfológica) as imagens foram recortadas em regiões de interesse, formando um banco com 200 imagens (90 MOC e 110 HiRISE).

Embora existam relatos de observações de rastros claros (com reflectância maior que a do terreno ao seu redor) de *dust devils*, estes são muito raros. A grande maioria das ocorrências é de rastros que contrastam com sua vizinhança por serem muito escuros. Nestas regiões a passagem dos vórtices atira a poeira na atmosfera e deixa à mostra o substrato da superfície. Uma dificuldade no momento da detecção destas feições é que elas não possuem tamanho, espessura ou orientação definidos. Além disso, a grande maioria dos *dust devils* são fenômenos de curta duração (algo entorno de poucos minutos) e nada impede que vários deles se formem numa mesma região, na mesma estação do ano, sobrepondo seus rastros uns aos outros e formando um emaranhado de riscos escuros nas imagens. Isto dificulta não só sua detecção como a determinação de sua direção.

Outro fator a ser considerado é a *força* do rastro. Rastros mais recentes formam caminhos escuros bem definidos, com bom contraste. Mas à medida que o tempo passa, a circulação de ar gradativamente torna a encobri-los com poeira e sedimentos, fazendo com que percam força e fiquem mais *apagados*, ou sem contraste. Muitas vezes é possível perceber rastros desse tipo numa análise visual, mas a detecção automática pode falhar nestas situações, especialmente se numa mesma região existem rastros recentes e mais antigos, praticamente apagados pela sedimentação.

Somado a isso, distorções radiométricas são comuns nas imagens e tons de cinza muito claros, causados pela reflectância de dunas ou rochas, atrapalham o processo de detecção, exigindo uma filtragem preliminar (Figura 71).

Porém, duas características puderam ser bem exploradas: embora apresentem tamanho variável, em geral, os rastros são as maiores feições escuras presentes nas cenas e seu tom de cinza muito escuro, em contraste com a superfície mais clara, facilita sua detecção após serem realçados por uma filtragem *top-hat*. Basta imaginar as imagens representadas por funções (Figuras 17 e 19) ou como superfícies topográficas, em que os rastros se configuram como vales. Nestes casos, o *top-hat* por fechamento, ou mesmo um fechamento algébrico (combinado com operações aritméticas entre imagens), com atributo de área, são bem indicados para realçar estes vales em relação ao restante das feições. O sucesso depende, logicamente, do elemento estruturante empregado. Elementos estruturantes podem assumir diversas formas, tamanhos e orientações e sua escolha depende de como as feições de interesse são modeladas. A única suposição possível de ser feita sobre a forma dos rastros é que ela é curvilínea. Com base nesta suposição os elementos estruturantes empregados no *top-*

hat também o são. Além disso, todas as direções são consideradas na filtragem. O tamanho do EE é definido de maneira a poder filtrar todos os rastros da cena no processo de fechamento. O fechamento empregado para tanto foi o fechamento por caminhos. A transformação obteve bons resultados, realçando sobremaneira as feições de interesse (Figura 72) e fazendo com que o histograma da imagem fosse simplificado.

Para a detecção dos rastros foi empregado o algoritmo de Otsu com uma restrição no espaço de busca pelo limiar. O método foi aplicado às 200 cenas do banco de imagens e os resultados foram analisados quantitativamente segundo a abordagem descrita por Bandeira et al. (2011). Para o cálculo da acurácia média global foram feitas imagens de referência (*ground truth*) em que os rastros foram marcados manualmente. A acurácia média ficou em  $92,02\% \pm 4,87\%$ . O resultado é expressivo ao se levar em conta a quantidade de cenas processadas e a grande variabilidade das bordas dos rastros que faz com que, mesmo sendo perfeita, do ponto de vista visual, a detecção, a análise quantitativa acusa alguns erros causados pela impossibilidade de fazer coincidir as bordas dos rastros nas imagens processadas e nas imagens *ground truth* feitas manualmente. A grande acurácia foi obtida a despeito da variação em resolução espacial das imagens e do tipo de sensor (Tabelas 6, 7 e 8) e também não apresentou qualquer dependência com a latitude e longitude solar (Figuras 85 e 86) das cenas. Além disso, o desvio padrão pequeno, abaixo dos 5%, prova que o método é robusto e funciona mesmo em situações mais difíceis em que o contraste dos rastros é baixo (Figura 76) ou outras feições geomorfológicas estão presentes (Figuras 77 a 82).

No capítulo 4 foram dados alguns exemplos de aplicação para os rastros detectados. A acurácia global média de ~92% permitiu calcular informações como largura média, contraste relativo e área coberta por rastros com boa acurácia. Os coeficientes de correlação entre estas quantidades calculadas a partir das imagens processadas e a partir do *ground truth* foram 89,05% para o contraste, 84,70% para a percentagem de área coberta e 86,15% para a largura média.

O contraste médio calculado para a região Aeolis concorda com as suposições feitas por Verba et al. (2010). Os autores comentam que quanto mais espessa a camada de areia, maior deverá ser o *dust devil* para que o substrato fique aparente e o rastro seja percebido, como acontece na cratera Gusev, localizada em Aeolis, e justamente a região que, de acordo com os resultados apresentados aqui, mostrou um menor índice de contraste entre rastros e sua vizinhança. Espera-se, portanto, segundo este raciocínio, que nas demais regiões estudadas a camada de areia e poeira que recobre a superfície seja mais fina.

A largura média dos rastros foi calculada com base na análise granulométrica das imagens feita por elementos estruturantes *discos*. Esta largura média dá uma ideia do diâmetro do vórtice dos *dust devils* e também pode ser utilizada para calcular probabilidades de ocorrência dos mesmos, de acordo com seus tamanhos, como descreve Lorenz (2009, 2011b).

A área coberta por rastros, facilmente obtida pela contagem de pixels relevantes da imagem, pode ser usada para estimar a frequência de formação de vórtices por região, bem como pode ser usada para inferir a quantidade de material como poeira e sedimentos injetada na atmosfera.

Outra característica bastante importante para o entendimento do comportamento da baixa atmosfera marciana é o cálculo da direção dos *dust devils*. A qualidade com que os rastros foram detectados pelo método automático proposto permitiu determinar a direção preponderante dos rastros com uma acurácia de 86,32%. As direções obtidas para Argyre foram comparadas com aquelas previstas pelo GCM e os resultados foram os mesmos, indicando um padrão de deslocamento do ventos no sentido E-W (componente zonal) na região. Na comparação entre as direções dos rastros calculadas automaticamente e aquelas relatadas em trabalhos científicos publicados algumas discrepâncias foram encontradas. Os trabalhos relatam feições eólicas formadas por ventos em direções ENE-WSW, WNW-ESE, NE-SW e NW-SE, enquanto o GCM prevê um comportamento global N-S e E-W. As divergências podem ser indícios de que há uma deficiência do modelo geral em prever variações locais, o que geralmente é o caso das análises feitas por autores como Fenton et al. (2005), Balme et al. (2003), Drake et al. (2006) e outros. Isso evidencia a importância do método proposto neste trabalho, o qual pode ser usado para estudar o comportamento direcional dos ventos na superfície de Marte com maior sucesso do que o GCM para análises feitas em escala local.

O método apresentado neste trabalho é inédito e até o momento não existe, sequer, outra abordagem para efetuar a detecção automática de rastros de *dust devils*. A detecção automática de rastros de *dust devils* pode ser usada, dentre outras coisas, para auxiliar o entendimento de processos eólicos ativos em Marte, entender variações locais de temperatura causadas pela injeção de poeira na atmosfera pelos vórtices, verificar e melhorar previsões do GCM, mapear áreas de risco detalhadamente e ajudar a compreender a evolução e transformações ocorridas no planeta Marte.

Para trabalhos futuros recomenda-se a expansão dos processamentos para as demais regiões do planeta Marte. Além de detectar os vários rastros em cada cena, os trabalhos deverão se concentrar na identificação individual de cada rastro e no cálculo de suas

características. Mais comparações com simulações feitas pelo GCM poderão confirmar, ou não, se o modelo de circulação geral prediz a direção dos ventos em escalas locais e regionais com boa precisão. A área coberta por rastros e suas larguras médias podem ser utilizadas para calcular a quantidade de sedimentos lançados na atmosfera pelos vórtices, bem como testar modelos de predição de ocorrência de *dust devils* em escala global. Suposições sobre a espessura da camada de poeira e areia que recobre o planeta podem ser feitas com base no contraste entre os rastros e a região vizinha. Além disso, mais estudos podem comprovar que a taxa de ocorrência de *dust devils* está fortemente relacionada com características geomorfológicas do terreno marciano.

---

## **REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIAS**

---

## REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIAS

APPLETON, B.; TALBOT, H. Efficient Path Openings and Closings. In: RONSE, C.; NAJMAN, L., DECENCIÈRE, E. *Mathematical Morphology: 40 years on*, SpringerLink, 2005. p. 33 – 42.

ARAÚJO, G. A.; SILVA, E. A. Geração de um Programa para Processamento Morfológico de Imagens Visando Auxiliar o Processo de Extração de Feições Cartográficas de Imagens Orbitais. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, 2009. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 6735 – 6742.

ARCHINAL, B. A.; KIRK, R. L.; DUXBURY, T. C.; LEE, E. M.; SUCHARSKI, R.; COOK, D. Mars Digital Image Model (MDIM) 2.1 control network. In: ISPRS Working Group Workshop “Advances in Planetary Mapping 2003”, 2003, Houston. *Anais do ISPRS Working Group Workshop “Advances in Planetary Mapping 2003”*, Houston, 2003. P. 1-3.

ARTERO, A. O. *Técnicas para Extração Automática de Feições Retas em Imagens Digitais*, 1999. 117 f. Dissertação (Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente – SP.

ASTROGEOLOGY. Disponível em: <<http://astrogeology.usgs.gov/Projections/MDIM21>>. Acesso em: fev. 2011.

ATREYA, S. K.; WONG, A. S.; RENNO, N. O.; FARRELL, W. M.; DELORY, G. T.; SENTMAN, D. D.; CUMMER S. A.; MARSHALL, J. R.; RAFKIN, J. C. R.; CATLING, D. C. Oxidant Enhancement in Martian Dust Devils and Storms: Implications for Life Habitability. *Astrobiology*, v. 6, n. 6. Mary Ann Lieberg, Inc., 2006.

BADDELEY, P. F. H. *Whirlwinds and Dust Storms of India*, ed. Bell and Daldey, London, 1860.

BAKKER, M. P. R. *Cartografia: Noções básicas*. Rio de Janeiro: DHN, 1965. 242p.

BALME, M. R.; GREELEY, R. Dust Devils on Earth and Mars. *Reviews of Geophysics*, v. 44, p. 1-22, 2006.

BALME, M. R.; WHELLEY, P. L.; GREELEY, R. Mars: Dust devil track survey in Argyre Planitia and Hellas Basin. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. E8, 2003.

BANDEIRA, L.; SARAIVA, J.; PINA, P. Impact Crater Recognition on Mars Based on a Probability Volume Created by Template Matching. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 45, n. 12, p. 4008 – 4015, dez. 2007.

BANDEIRA, L.; MARQUES, J. S.; SARAIVA, J.; PINA, P. Automated Detection of Martian Dune Fields. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, v. 8, n. 4, p. 626 – 630, 2011.

BANON, G. J. F.; BARRERA, J. *Bases da Morfologia Matemática para a análise de imagens binárias*, 2 ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1998. 230p.

BARLOW, N. *Mars: Na Introduction to its Interior, Surface and Atmosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 276 p.

BARNES, J. R.; POLLACK, J. B.; HABERLE, R. M.; LEOVY, C. B.; ZUREK, R. W.; LEE, H.; SCHAFFER, J. Mars Atmospheric Dynamics as Simulated by the NASA Ames General Circulation Model 2. Transient Baroclinic Eddies. *Journal of Geophysical Research*, v. 98, n. E2, p. 3125 - 3148, 1993.

BARRERA, J. *Uma abordagem unificada para os problemas de Processamento Digital de Imagens: a Morfologia Matemática*. 1987. Dissertação – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP.

BASU, S. *Simulations of the Martian Dust Cycle with a General Circulation Model*, 2005. Tese para obtenção do título de PhD - California Institute of Technology, Pasadena, Califórnia.

BASU, S.; RICHARDSON, M. I.; WILSON, R. J. Simulation of the Martian dust cycle with the GFDL Mars GCM. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, E11006, p. 1-25, 2004.

BATSON, R. M.; BRIDGES, P. M.; INGE, J. L. *Atlas of Mars: the 1:5.000.000 map series*. Arizona: U.S. Geological Survey Flagstaff, 1979.

BEAN, K. M.; LEMMON, M. T. Surface Stereo Imager Observations of Dust Devils at the Phoenix Landing Site. In: XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference, Houston, 12-16 de março de 2007. *Anais do XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference*, 2007.

BECK, S. M. Co-Bore-sighted Coherent Laser Velocimeter and Direct Detection Lidar for Dust Devil Characterization. In: 2007 IEEE Aerospace conference, Montana, 3-10 de março de 2007. *Anais do IEEE Aerospace conference*, 2007.

BERMAN, D. C.; BALME, M. R.; RAFKIN, S. C. R.; ZIMBELMAN, J. R. Transverse Aeolian Ridges (TARs) on Mars II: Distributions, orientations and ages. *Icarus*, v. 213, n. 1, p. 116-130, 2011.

BREEN, E. J.; JONES, R. Attribute Openings, Thinnings, and Granulometries. *Computer Vision and Image Understanding*, v. 64, n. 3, p. 377 – 389, 1996.

BRIDGES, N. T.; KESZTHELYI, L. P.; MCEWEN, A. S.; THOMAS, N.; THOMSON, B. J. Aeolian Studies from HIRISE. In: XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference 2007, Houston, 12-16 de março de 2007. *Anais do XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference 2007*.

BROOKS, H. B. Rotation of dust devils. *Journal of Meteorology*, v. 17, p. 84–86, 1960.

BUCKLEY, M.; TALBOT, H. Flexible Linear Openings and Closings. In: GOUTSIAS, J., VINCENT, L., BLOOMBERG, D. S. *Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing*, SpringerLink, 2002. p. 109 – 118.

CALEF, F. J.; SHARPTON, V. Enigmatic Linear Features in the Northern Hemisphere of Mars: their formation process. *Geophysical Research Letters*, v. 32, p. 1-4, 2005.

CANDEIAS, A. L. B. *Aplicação de Morfologia Matemática à análise de imagens de Sensoriamento Remoto*, 1997. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP.

CANTOR, B.; MALIN, M.; EDGETT, K. Multiyear Mars Orbiter Camera (MOC) Observations of Repeated Martian Weather Phenomena During the Northern Summer Season. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. E3, 2002.

CANTOR, B. A.; KANAK, K. M.; EDGETT, K. S. Mars Orbiter Camera Observations of Martian Dust Devils and their Tracks (September 1997 to January 2006) and Evaluation of Theoretical Vortex Models. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, p. 1 – 49, 2006.

CARR, M. H. *The Surface of Mars*. New York: Cambridge University Press, 2006. 322p.

CASTANO, A.; FUKUNAGA, A.; BIESIADECKI, J.; NEAKRASE, L.; WHELLEY, P.; GREELEY, R.; LEMMON, M.; CASTANO, R.; CHIEN, S. Autonomous Detection of Dust Devils and Clouds on Mars. In: IEEE International conference on Image Processing 2006, Atlanta, 8-11 de outubro de 2006. *Anais do IEEE International conference on Image Processing*, p. 2765-2768, 2006.

\_\_\_\_\_. Automatic Detection of Dust Devils and Clouds on Mars. *Machine Vision and Applications*, 2008.

CASTANO, R.; ESTLIN, T; GAINES, D; CASTANO, A.; CHOUNIARD, C.; BORNSTEIN, B.; ANDERSON, R. C.; CHIEN, S.; FUKUNAGA, A.; JUDD, M. Opportunistic Rover Science: Finding and Reacting to Rocks, Clouds and Dust Devils. In: IEEE Aerospace conference 2006, Montana, 4-11 de março de 2006, p. 1-16, 2006.

CHATTERJEE, S.; HADI, A. S. *Regression Analysis by Example*. Hoboken: Wiley, 2006. 365 p.

CHOI, D. S.; DUNDAS, C. M. Wind Measurements of Martian Dust Devils from HiRISE. In: XLII Lunar and Planetary Sciences Conference, The Woodlands, 07-11 de março de 2011. *Anais do XLII Lunar and Planetary Sciences Conference*, 2011.

DESCH, S. J.; WILSON, G. R.; PERRET, B.; NEAKRASE, L. D. V.; GREELEY, R. Investigations into Dust Charging and Transport in Martian and Terrestrial Dust Devils. In: XXXVII Lunar and Planetary Science Conference, 2006. *Anais do XXXVII Lunar and Planetary Science Conference*, 2006.

DOUGHERTY, E. R.; LOTUFO, R. A. *Hands-on morphological image processing*. Bellingham, Washington – EUA: SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2003.

DOWDY, S.; WEARDEN, S.; CHILKO, D. *Statistics for Research*. Hoboken: Wiley, 2004. 634 p.

DRAKE, N. B; TAMPPARI, L. K.; BAKER, R. D.; CANTOR, B. A.; HALE, A. S. Dust devil tracks and wind streaks in the North Polar Region of Mars: a study of the 2007 Phoenix Mars Lander Sites. *Geophysical Research Letters*, v. 33, p.1-4, 2006.

DUXBURY, T.; KIRK, R. L.; ARCHINAL, B. A.; NEUMANN, G. A. Mars Geodesy/Cartography Working Group Recommendations on Mars Constants and Coordinate Systems. In: Symposium on Geopotential Theory, Processing and Applications, 2002. *Anais do Symposium on Geopotential Theory, Processing and Applications*, 2002.

EDGETT, K. S. Low-albedo surfaces and eolian sediment: Mars Orbiter Camera views of western Arabia Terra craters and wind streaks. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, 2002.

EDGETT, K. S.; MALIN, M. C. Martian dust raising and surface albedo controls: Thin, dark (and sometimes bright) streaks and dust devils in MGS MOC high resolution images. In: XXXI Lunar and Planetary Sciences Conference, Houston, 13-17 de março de 2000. *Anais do XXXI Lunar and Planetary Sciences Conference*, 2000.

ELETRONIC Newsletter on Mathematical Morphology. *Morphology Digest*. Disponível em: <<http://mdigest.jrc.ec.europa.eu/digest.aspx?page=../DIGEST/Digest07-1/node5.html>> Acesso em: jan. 2010.

ELLEHOJ, M. D.; GUNNLAUGSSON, H. P.; TAYLOR, P. A.; KAHANPÄÄ, H.; BEAN, K. M.; CANTOR, B. A.; GHEYNANI, B. T.; DRUBE, L.; FISHER, D.; HARRI, A. M.; HOLSTEIN-RATHLOU, C.; LEMMON, M. T.; MADSEN, M. B.; MALIN, M. C.; POLKKO, J.; SMITH, P. H.; TAMPPARI, L. K.; WENG, W.; WHITEWAY, J. Dust Devils and vortices at the phoenix landing site on Mars. In: XL Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, 23-27 de março de 2009. *Anais do XL Lunar and Planetary Science Conference*, 2009.

FACON, J. *Morfologia Matemática: teoria e exemplos*. Curitiba: PUC, 1996. 295p.

FENTON, L. K. *Aeolian Processes on Mars: Atmospheric Modeling and GIS Analysis*, 2003. Tese – California Institute of Technology, Pasadena, California, 2003.

FENTON, L. K.; MICHAELS, T. I. Mesoscale and Large Eddy Simulations of Dust Devils in Amazonis Planitia, Mars. In: XLII Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, 07-11 de março de 2011. *Anais do XLII Lunar and Planetary Science Conference*, 2011.

FENTON, L. K.; TOIGO, A. D.; RICHARDSON, M. I. Aeolian processes in Proctor Crater on Mars: Mesoscale modeling of dune-forming winds. *Journal of Geophysical Research*, v. 110, 2005.

FERRI, F.; SMITH, P. H.; LEMMON, M.; RENNO, N. Dust Devils as Observed by Mars Pathfinder. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. E12, 2003.

FIDALGO, E. C. C. *Exatidão no Processo de Mapeamento Temático da Vegetação de uma Área de Mata Atlântica no Estado de São Paulo, a Partir de Imagens TM-Landsat*, 1995. 186 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos - SP.

FISHER, J. A.; RICHARDSON, M. I.; NEWMAN, C. E.; SZWAST, M. A.; GRAF, C.; BASU, S.; EWALD, S. P.; TOIGO, A. D.; WILSON, R. J. A survey of Martian dust devil activity using Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera images. *Journal of Geophysical Research*, v. 110, 2005.

FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FOLKNER, W. M.; YODER, C. F.; YUAN, D. N.; STANDISH, E. M.; PRESTON, R. A. Interior Structure and Seasonal Mass Redistribution of Mars from Radio Tracking of Mars Pathfinder, *Science*, v. 278, p. 1749-1751, 1997.

FORGET, F.; HOURDIN, F.; FOURNIER, R.; HOURDIN, C.; TALAGRAND, O. Improved General Circulation Models of the Martian Atmosphere from the Surface to Above 80 km. *Journal of Geophysical Research-Planets*, v. 104, p. 155-176, 1999.

GATO, H. E. R.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. Uma Abordagem Semi-Automática para a Extração de Feições Cartográficas. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro (RJ), v. 53, n. 1, p. 16-28, 2001.

GEISSLER, P. E.; ENGA, M. T. Surface Changes on Mars: Gradual or Episodic? In: XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference, Houston, 12-16 de março de 2007. *Anais do XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference*, 2007.

GHEYNANI, B. T.; TAYLOR, P. A. Large Eddy Simulation of typical dust devil-like vortices in highly convective Martian boundary layers at the Phoenix lander site. *Planetary and Space Science*, v. 59, p. 43–50, 2011.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de Imagens Digitais*. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2000. 508p.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E; EDDINS, S. L. *Digital Image Processing Using Matlab*. Prentice Hall, 2003. 609p.

GOSH, P. K. DEGUCHI, K. *Mathematics of Shape Description: a Morphological Approach to Image Processing and Computer Graphics*. John Wiley & Sons, 2008. 254p.

GOUTSIAS, J.; HEIJMANS, H. J. A. M. Fundamenta Morphologicae Mathematicae. *Mathematical Morphology*: edição livro do periódico Fundamentae Informaticae, v. 41, n. 1-2, ISSN 0169-2968, Amsterdam: IOS Press, 2000. p. 1 – 31.

GRANT, J. A.; SCHULTZ, P. H. Possible tornado-like tracks on Mars. *Science*, v. 237, p. 883– 885, 1987.

GREELEY, R.; BATSON, R. M. *Planetary Mapping*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 312 p.

GREELEY, R.; THOMPSON, S. D. Mars: Aeolian features and wind predictions at the Terra Meridiani and Isidis Planitia potential Mars Exploration Rover landing sites. *Journal of Geophysical Research*, v. 108(E12), 2003.

GREELEY, R.; WHELLEY, P. L.; NEAKRASE, L. D. V. Martian dust devils: directions of movement inferred from their tracks. *Journal of Geophysical Research*, v. 31, 2004.

GREELEY, R.; LANCASTER, N.; LEE, S.; THOMAS, P. Martian aeolian processes, sediments and features. In: KIEFFER, H. H. *Mars*, Tucson: University of Arizona Press, 1992, p. 730–766.

GREELEY, R.; RAFKIN, S. C. R.; HABERLE, R. M.; KUZMIN, R. O. Topography and aeolian features: Dunes and streaks compared with global and mesoscale wind predictions. In: XXXIV Lunar and Planetary Sciences Conference, 2003. *Anais do XXXIV Lunar and Planetary Sciences Conference*, 2003.

GREELEY, R.; KUZMIN, R. O.; RAFKIN, S. C. R.; MICHAELS, T. I.; HABERLE, R. Wind-related features in Gusev crater, Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 108(E12), 2003.

GREELEY, R.; BALME, M. R.; IVERSEN, J. D.; METZGER, S.; MICKELSON, R.; PHOREMAN, J.; WHITE, B. Martian dust devils: Laboratory simulations of particle threshold. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. E5, p. 1-12, 2003.

GREELEY, R.; WHELLEY, P. L.; ARVIDSON, R. E.; CABROL, N. A.; FOLEY, D. J.; FRANKLIN, B. J.; GEISSLER, P. G.; GOLOMBEK, M. P.; KUZMIN, R. O.; LANDIS, G. A.; LEMMON, M. T.; NEAKRASE, L. D. V.; SQUYRES, S. W.; THOMPSON, S. D. Active dust devils in Gusev crater, Mars: Observations from the Mars Exploration Rover Spirit. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, p.1-16, 2006.

HABERLE, R. M.; POLLACK, J. B.; BARNES, J. R.; ZUREK, R. W.; LEOVY, C. B.; MURPHY, J. R.; LEE, H.; SCHAEFFER, J. Mars atmospheric dynamics as simulated by the NASA Ames General Circulation Model: 1. The zonal-mean circulation. *Journal of Geophysical Research*, v. 98, n. E2, p. 3093–3123, 1993.

HALL, N. W.; LEMMON, M. T. Mass Ejected From Martian Dust Devils as a Function of Height and Dust Devil Morphology. In: XL Lunar and Planetary Science Conference,

Woodlands, 23-27 de março de 2009. *Anais do XL Lunar and Planetary Science Conference*, 2009.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. *Matlab 6: Curso completo*. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 676 p.

HARALICK, R. M.; STERNBERG S. R.; ZHUANG X. Image analysis using mathematical morphology. *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. PAMI-9, n. 4, p. 532-555, Jul. 1987.

HEIJMANS, H.; BUCKLEY, M.; TALBOT, H. Path Openings and Closings. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. v. 22, p. 107 – 119, 2005.

\_\_\_\_\_. Path-Based Morphological Openings. In: International Conference on Image Processing, 2004. *Proceedings of the International Conference on Image Processing, 2004*. IEEE Explore, 2005. p. 3085 – 3088.

HENDRIKS, C. L. L. Constrained and Dimensionality-Independent Path Openings. *IEEE Transactions on Image Processing*. v. 19, n. 6, p. 1587 – 1595, 2010.

HINSON, D. P.; PÄTZOLD, M.; TELLMANN, S.; HÄUSLER, B.; TYLER, G. L. The depth of the convective boundary layer on Mars. *Icarus*, v. 198, p. 57–66, 2008.

HOWARD, A. D. The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits. *Icarus*, v. 144, p. 267– 288, 2000.

IDSO, S. B; A. Tornado or dust devil: the enigma of desert whirlwinds. *American Scientist*, v. 62, n. 5, p. 530– 541, 1974.

INPE. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos - SP: INPE, 2001.

IVES, R. L. Behavior of dust devils. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 28, p. 168–174, 1947.

JACKSON, T. L; FARREL, W. M. Electrostatic Fields in Dust Devils: An Analog to Mars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 44, n. 10, p. 2942 - 2949, 2006.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos – SP: Parêntese, 2009. 598 p.

KAPUR, J. N.; SAHOO, P. K.; WONG, K. C. A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, v. 29, p. 273 – 285, 1985.

KHAZINS, V. M.; RYBAKOV, V. A.; GREELEY, R.; BALME, M. The Dust Ejection Induced by a Meteoroid Impact as a Possible Initiator of Dust Devils on Mars: Laboratory Experiment and Numerical Simulation. *Solar System Research*, v. 38, n. 1, p. 12 – 20, 2004.

KIRKHAM, H. Dust Devils and Dust Fountains: The Measurement Challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, v. 9, n. 6, p. 48-52, 2006.

KUZMIN, R. O.; GREELEY, R.; RAFKIN, S. C. R.; HABERLE, R. Wind-related modification of some small impact craters on Mars. *Icarus*, v. 153, p. 61– 70, 2001.

LEWIS, S. R.; COLLINS, M.; READ, P. L.; FORGET, F.; HOURDIN, F.; FOURNIER, R.; HOURDIN, C.; TALAGRAND, O. A Climate Database for Mars. *Journal of Geophysical Research-Planets*, v. 104, p. 177-194, 1999.

LIAO, P. S.; CHEN, T. S.; CHUNG, P. C. A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding. *Journal of Information Science and Engineering*, v. 17, p. 713 – 727, 2001.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote Sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, 6 ed., 2007. 804 p.

LOPES, F. M. *Um Modelo Perceptivo de Limiarização de Imagens Digitais*, 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – UFPR. Paraná – PR.

LORENZ, R. D. Power law of dust devil diameters on Mars and Earth. *Icarus*, v. 203, p. 683– 684, 2009.

\_\_\_\_\_. Studies of Desert Dust Devils with a Sensor Network, Timelapse Cameras and Thermal Imaging. In: IEEE Aerospace conference, Montana, 6-13 de março de 2010, p. 1-7.

\_\_\_\_\_. Experiments in Timelapse Camera Observations of Dust Devil Activity at Eldorado Playa, Nevada. In: XLII Lunar and Planetary Science Conference, 2011, The Woodlands, 7-12 de março de 2011. *Anais do XLII Lunar and Planetary Science Conference*, 2011a.

\_\_\_\_\_. On the Statistical Distribution of Dust Devil Diameters. *Icarus*, v. 215, n. 1, p. 381-390, 2011b.

\_\_\_\_\_. Power Law Distribution of Pressure Drops in Dust Devils: Observation Techniques and Earth-Mars Comparison. *Planetary and Space Science*, v. 60, n. 1, p. 370-375, 2011c.

LORENZ, R. D.; JACKSON, B.; BARNES, J. W. Inexpensive Time-Lapse Digital Cameras for Studying Transient Meteorological Phenomena: Dust Devils and Playa Flooding. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 27, p. 246-256, 2009.

LYNN, D. V.; GREELEY, R.; HAAN, F. L.; SARKAR, P.; IVERSEN, J. D.; BALME, M. R.; EDDLEMON, E. E. Dust Devils on Earth and Mars: Extension of Particle Threshold Laboratory Simulations. In: XXXVII Lunar and Planetary Science Conference, 2006. *Anais do XXXVII Lunar and Planetary Science Conference*, 2006.

LYNN, D. V.; GREELEY, R. Laboratory Studies of Dust Devil Sediment Flux: Comparison with Data from Gusev Crater, Mars. In: XXXIX Lunar and Planetary Science Conference, 2008. *Anais do XXXIX Lunar and Planetary Science Conference*, 2008.

LYONS, T. J.; NAIR, U. S; FOSTER, I. J. Clearing enhances dust devil formation. *Journal of Arid Environments*, v. 72, p. 1918– 1928, 2008.

MATHERON, G. *Eléments pour une Théorie des Milieux Poreux*. Paris: Masson et Cie, 1967. 168 p.

\_\_\_\_\_. *Random sets and integral geometry*. Nova Iorque: Wiley, 1975. 261 p.

MARTIN, D. R.; FOWLKES, C. C.; MALIK, J. Learning to Detect Natural Image Boundaries Using Local Brightness, Color and Texture Cues. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 26, n. 5, p. 530 – 549, 2004.

MATHERON, G.; SERRA, J. *The Birth of Mathematical Morphology*. In: International Symposium on Mathematical Morphology VI, 2002, Austrália. *Anais do VI International Symposium on Mathematical Morphology*, Austrália: CSIRO, 2002, p. 1-16.

MATLAB. *Software Matlab versão 7.6.0.324 (R2008a)*. The MathWorks, 2008.

MATTA, W. N. *Metodologia para Detecção de Máculas em Micrografias Utilizando Morfologia Matemática*, 1998. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais – MG.

MCANDREW, A. *Introduction to Digital Image Processing with Matlab*. Boston, Massachusetts: Course Technology, 2004. 509 p.

MEDEIROS, N. G. *Segmentação Morfológica Aplicada à Cartografia*, 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – UNESP, Presidente Prudente, 2003.

MENESES, P. R.; NETTO, J. S. M. *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília: Ed. UnB, 2001. 262 p.

METZGER, S.; BALME, M.; TOWNER, M.; BOS, B.; PATHARE, A. Direct in-situ Measurement of Natural Dust Devil Sediment Loading and Flux. In: XL Lunar and Planetary Science Conference, 2009. *Anais do XL Lunar and Planetary Science Conference*, 2009.

METZGER, S. M.; CARR, J. R.; JOHNSON, J. R.; PARKER, T. J.; LEMMON, M. T. Techniques for identifying Dust Devils in Mars Pathfinder Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 38, n. 2, p. 870-876, 2000.

METZGER, S.; BALME, M.; PATHARE, A.; RENNO, N.; TOWNER, M.; SPIGA, A.; ELLIOTT, H. High-Resolution Dust Devil Sampling for Sediment Loads, Wind Speeds, Temperature and Pressure Excursions. In: XLII Lunar and Planetary Science Conference, 2011, The Woodlands, 7-12 de março de 2011. *Anais do XLII Lunar and Planetary Science Conference*, 2011.

MILTON, E. J. Principles of Field Spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, Londres, v. 8, n. 12, p. 1807 – 1827, 1987.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2 ed. São Paulo - SP: Ed. UNESP, 2008. 476 p.

MOREIRA, M. A. *Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação*. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. 250 p.

MURPHY, J. R.; NELLI, S. Mars Pathfinder convective vortices: frequency of occurrence. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 23, 2002.

NASA. Disponível em: <<http://mars.jpl.nasa.gov/missions>>. Acesso em: 17 jun. 2009.  
NAJMAN, L; TALBOT, H. *Mathematical Morphology: from theory to applications*. Hoboken: Wiley, 2010. 507 p.

\_\_\_\_\_. *Mars Global Surveyor Arrival*, Press kit. Nasa, 1997. Disponível em: <<http://mars.jpl.nasa.gov/missions/past/globalsurveyor.html>>. Acesso em: 17 jun. 2009.

\_\_\_\_\_. *Mars Reconnaissance Orbiter Arrival*, Press kit. Nasa, 2006. Disponível em: <<http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mro/mission/overview/>>. Acesso em: mar. 2010.

NEAKRASE, L. D. V.; GREELEY, R. Dust devil sediment flux on Earth and Mars: Laboratory simulations. *Icarus*, v. 206, p. 306-318, 2010.

NETA, S. R. A.; DUTRA, L. V.; ERTHAL, G. J. Limiarização Automática em Histogramas Multimodais. In: VII Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, 2008. *Anais do VII Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications*, 2008.

NEWMAN, C. E. *Modelling the Dust Cycle in the Martian Atmosphere*, 2001. Tese (Doutorado) – St. Anne’s College, University of Oxford. Disponível em: <<http://web.gps.caltech.edu/~claire/thesis/>>. Acesso em: fev. 2010.

NIBLACK, W. *An introduction to Digital Image Processing*. Prentice Hall, 1986. 215 p.

NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 363 p.

O’KEEFER, K. *Simulation and Evaluation of the Performance of the Proposed Mars Network Constellation for Positioning, Orbit Improvement, and Establishment of a Spatial Reference Frame for Mars*, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Geomática) – Universidade de Calgary, Canadá.

OLIVEIRA, L. A. J.; FALCON, R. R. *Utilização de Câmaras Digitais na Atualização de Mapeamento*, 1999. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Cartográfica) – UNESP, Presidente Prudente.

ÖRMO, J.; KOMATSU, G. Mars Orbiter Camera observation of linear and curvilinear features in the Hellas basin: indications for multiple processes of formation. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, 2003.

OTSU, N. A threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 9, n. 1, p. 62-69, 1979.

PATHARE, A. V.; BALME, M. R.; METZGER, S. M.; SPIGA, A.; TOWNER, M. C.; RENNO, N. O.; SACA, F. Assessing the power law hypothesis for the size–frequency distribution of terrestrial and martian dust devils. *Icarus*, v. 209, p. 851–853, 2010.

POLLACK, J. B.; HABERLE, R. M.; MURPHY, J. R. Simulations of the general Circulation of the Martian Atmosphere 2. Seasonal Pressure Variations. *Journal of Geophysical Research*, v. 98, n. E2, p. 3149 - 3181, 1993.

POZ, D. A. P.; AGOURIS, P. Um Algoritmo de Otimização Global para a Extração de Rodovias em Imagens Digitais. *Revista Brasileira de Cartografia*, Curitiba (PR), n. 53, p. 65-72, 2001.

PRÉTEUX, F. *Mathematical Morphology in Image Processing*. New York: E. Dougerthy, Rochester Institute of Technology, 1993.

QUEIRÓZ FILHO, A. P. Q. *Ortofoto Digital para Atualização Cartográfica em um Sistema de Informações Geográficas*. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

REISS, D.; RAACK, J.; HIESINGER, H. Bright dust devil tracks on Earth: Implications for their formation on Mars. *Icarus*, v. 211, p. 917–920, 2011.

REISS, D.; ZANETTI, M.; NEUKUM, G. Multitemporal Observations of Identical Active Dust Devils on Mars with the High Resolution Stereo Camera (HRSC) and Mars Orbiter Camera (MOC). *Icarus*, v. 215, n. 1, p. 358-369, 2011.

REISS, D.; LÜSEBRINK, D.; HIESINGER, H.; KELLING, T.; WURM, G.; TEISER, J. High Altitude Dust Devils on Arsia Mons, Mars: Testing the Greenhouse and Thermophoresis Hypothesis of Dust Lifting. In: XL Lunar and Planetary Science Conference, 2009. *Anais do XL Lunar and Planetary Science Conference*, 2009.

RENNÓ, N. O. A thermodynamically general theory for convective vortices. *Tellus*, n. 60A, p. 688-699, 2008.

RENNÓ, N. O.; NASH, A. A. Martian and terrestrial dust devils: test of a scaling theory using Pathfinder data. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 1859-1865, 2000.

RENNÓ, N. O.; BURKETT, M. L.; LARKIN, M. P. A Simple Thermodynamical Theory for Dust Devils. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 55, p. 3244-3252, 1998.

RENNÓ, N. O.; ABREU, V. J.; KOCH, J.; SMITH, P. H.; HARTOGENSIS, O. K.; BRUIN, H. A. R.; BUROSE, D.; DELORY, G. T.; FARRELL, W. M.; WATTS, C. J.; GARATUZA, J.; PARKER, M.; CARSWELL, A. MATADOR 2002: a Pilot Field Experiment on Convective Plumes and Dust Devils. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, 2004.

RICHARDS, A. J.; JIA, X. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. Canberra, Australia: Springer-Verlag, 1998. 363 p.

RINGROSE, T. J.; PATEL, M. R.; TOWNER, M. C.; BALME, M.; METZGER, M. S.; ZARNECKI, J. C. The meteorological signatures of dust devils on Mars. *Planetary and Space Science*, v. 55, p. 2151–2163, 2007.

ROSA, F. S. *Metrópole e Representação Cartográfica: o sistema cartográfico metropolitano de São Paulo*. Tese (Doutorado), 208 f. – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ROSSI, P. Possible Dust Devils Tracks Detected in Tenere Desert (Niger): an Analogue to Mars. In: Lunar and Planetary Science XXXIII, Houston, 11-15 de março de 2002. *Anais do XXXIII Lunar and Planetary Science Conference*, 2002.

ROSSI, A. P.; MARINANGELI, L. The First Terrestrial Analogue to Martian Dust Devil Tracks Found in Ténéré Desert, Niger. *Geophysical Research Letters*, v. 31, 2004.

RYAN, J. A. Notes on the Martian yellow clouds. *Journal of Geophysical Research*, v. 69, p. 3759– 3770, 1964.

SAUVOLA, T.; SEPPANEN, T.; HAAPAKOSKI, S.; PIETIKAINEN, M. Adaptive Document Binarization. In: IV International Conference on Document Analysis and Recognition, Alemanha, 1997. *Anais do IV International Conference on Document Analysis and Recognition*, 1997.

SCHMITT, M. Variations on a Theme in Binary Mathematical Morphology. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, v. 2, n. 3, p. 244 – 258, 1991.

SDC Morphology Toolbox for Matlab 5, 2001. Tutorial. Naperville, USA.

SERRA, J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Londres: Academic Press, 1982. 610 p.

\_\_\_\_\_. Introduction to mathematical morphology. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, v. 35, n. 3, p. 283 – 305, 1986.

\_\_\_\_\_. *Image Analysis and Mathematical Morphology, volume 2: theoretical advances*. Londres: Academic Press, 1988. v. 2. 411 p.

SHIH, F. Y. *Image processing and Mathematical Morphology: fundamentals and applications*. CRC, 2009. 439 p.

SILVA, E. A. *Extração de feições Cartográficas de Imagens Multiespectrais Fundidas*, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia dos Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, E. A.; LEONARDI, F.; RODRIGUES, T. G. Application of Morphological Routine for Detection of Airport Tracks in High Resolution Images. In: ASPRS Annual Conference, Baltimore, 2009. *Anais do ASPRS Annual Conference, Baltimore, 2009*.

SILVA, J.; AMARAL, P.; PEREIRA, J. M.; PINA, P.; MUGE, F. Segmentation and Orientation Analysis of Fire Scars in Remotely Sensed Images. In: 11<sup>a</sup> Conferência Portuguesa de Reconhecimento de Padrões, Porto, Portugal, 2000. *Anais da 11<sup>a</sup> Conferência Portuguesa de Reconhecimento de Padrões, Porto, Portugal, 2000*.

SINCLAIR, P. C., *A quantitative analysis of the dust devil*, 1966, (Tese de doutorado) - Universidade do Arizona, Tucson, 1966.

SNYDER, J. P. *Map projections: a working manual*. U. S. Geological Survey, 1926. 394 p.

SOILLE, P. *Morphological Image Analysis*. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 316 p.

\_\_\_\_\_. *Morphological Image Analysis*. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 391 p.

SOONG, T. T. *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*. England: Wiley, 2004. 408 p.

SPIGA, A.; FORGET, F.; LEWIS, S. R.; HINSON, D. P. Structure and dynamics of the convective boundary layer on Mars as inferred from large-eddy simulations and remote-sensing measurements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, n. 136, p. 414–428, 2010.

STANZEL, C.; PATZOLD, M.; WENNMACHER, A. Pattern Recognition Algorithms for an Automated Search for Martian Dust Devils. In: II workshop on Mars atmosphere modelling and observations, Granada, 27 de fevereiro a 3 de março de 2006, p. 238.

STANZEL, C.; PÄTZOLD, M.; GREELEY, R.; HAUBER, E.; NEUKUM, G. Dust devils on Mars observed by the High Resolution Stereo Camera. *Geophysical Research Letters*, v. 33, p.1-5, 2006.

STANZEL, C.; PÄTZOLD, M.; WILLIAMS, D. A.; WHELLEY, P. L.; GREELEY, R.; NEUKUM, G. Dust devil speeds, directions of motion and general characteristics observed by the Mars Express High Resolution Stereo Camera. *Icarus*, v. 197, p. 39–51, 2008.

STATELLA, T. *Morfologia Matemática aplicada à Cartografia*, 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – UNESP, Presidente Prudente – SP, 2005.

STATELLA, T.; SILVA, E. A. Morfologia Matemática aplicada à detecção de sombras e nuvens em imagens de alta resolução. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 256-271, 2008.

\_\_\_\_\_. Extração de drenagens em imagens digitais através de técnicas de Morfologia Matemática. *Profiscientia*, Cuiabá – MT, n. 4, p. 359 – 376, 2009.

\_\_\_\_\_. Mathematical Morphology for Detecting Martian Dust Devils Tracks and Inferring their Movement Directions. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 2, n. 63, p. 211-219, 2011.

STROPPIA, R. G.; LEONARDI, F.; SILVA, E. A. Cartographic Update Through Digital Image Processing by Mathematical Morphology. In: XXXIII International Symposium on Remote Sensing of Environment, Maryland, 2009. *Anais do XXXIII International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 2009.

TALBOT, H.; APPLETON, B. Efficient Complete and Incomplete Path Openings and Closings. *Image and Vision Computing*, v. 25, p. 416 – 425, 2007.

TANNER, W. F. Spiral flow in rivers, shallow seas, dust devils and models. *Science*, v. 139, p. 41– 42, 1963.

TAYLOR, D. R. F. A conceptual basis for cartography: new directions for the information era. *Cartographica*, v. 28, n. 4, p. 1-8, 1991.

TAYLOR, F. W. *The Scientific Exploration of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 362 p.

THOMAS, P.; GIERASCH, P. Dust Devils on Mars. *Science*, p. 175-177, 1985.

TOIGO, A. D.; RICHARDSON, M. I.; EWALD, S. P.; GIERASCH, P. Numerical simulation of Martian dust devils. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. E6, p. 1-14, 2003.

TOWNER, M. C. Characteristics of large Martian dust devils using Mars Odyssey Thermal Emission Imaging System visual and infrared images. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, p.1-11, 2009.

TRIER, O.; TAXT, T. Improvement of Integrated Function Algorithm for Binarization of Document Images. *Pattern Recognition Letters*, v. 16, n. 3, p. 277 – 283, 1995.

VALERO, S.; CHANUSSOT, J.; BENEDIKTSSON, J. A.; TALBOT, H.; WASKE, B. Advanced Directional Mathematical Morphology for the Detection of the Road Network in Very High Resolution Remote Sensing Images. *Pattern Recognition Letters*, Elsevier, v. 31, n. 10, p. 1120 – 1127, 2010.

VERBA, C. A.; GEISLER, P. E.; TITUS, T. N.; WALLER, D. Observations from the High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE): Martian dust devils in Gusev and Russell craters. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, p.1-11, 2010.

VEVERKA, J. Variable features on Mars VIII-Dark filamentary markings on Mars. *Icarus*, v. 27, p. 495– 502, 1976.

VINCENT, L. Morphological Area Opening and Closings for Grayscale Images. In: Shape in Picture 92, Workshop, Holanda, 1992. *Anais do Shape in Picture 92*, Holanda, 1992.

\_\_\_\_\_. Grayscale Area Opening and Closing, their Efficient implementation and Applications. In: Eurasip Workshop on Mathematical Morphology and its Applications to Signal Processing, Barcelona, Espanha, 1993. *Anais do Eurasip Workshop on Mathematical Morphology and its Applications to Signal Processing*, 1993.

\_\_\_\_\_. Granulometries and Opening Trees. *Mathematical Morphology*: edição livro do periódico *Fundamentae Informaticae*, v. 41, n. 1-2, ISSN 0169-2968, Amsterdam: IOS Press, 2000. p. 57 – 90.

WARNER, N. H.; FARMER, J. D. Importance of Aeolian Processes in the Origin of the North Polar Chasmata, Mars. In: XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference, 2007. *Anais do XXXVIII Lunar and Planetary Science Conference*, 2007.

WHELLEY, P. L.; GREELEY, R. Latitudinal dependency in dust devil activity on Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, (E10003), p.1-5, 2006.

\_\_\_\_\_. The distribution of dust devil activity on Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, (E7), p.1-12, 2008.

WHELLEY, P. L.; GREELEY, R.; NEAKRASE, L. Martian Dust Devil Tracks: Inferred Directions of Movement. In: XXXV Lunar and Planetary Science Conference, Houston, 15-19 de março de 2004. *Anais do XXXV Lunar and Planetary Science Conference*, 2004a.

\_\_\_\_\_. Martian dust devils: Directions of movement inferred from their tracks. *Geophysical Research Letters*, v. 31, p. 1-3, 2004b.

WOLF, C; JOLION, J; CHASSAING, F. Text Localization, Enhancement and Binarization in Multimedia Documents. In: International Conference on Pattern Recognition. *Anais do International Conference on Pattern Recognition*, 2002, p. 1057 – 1040.

WU, S.; AMIN, A. Automatic Thresholding of Gray-level Using Multi-stage Approach. In: Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition, 2003. *Anais do Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition*, 2003.

YANG, F.; MLSNA, P. A.; GEISLER, P. Gaussian-Based Filters for Detecting Martian Dust Devils. In: VII IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, Denver, 26-28 de março de 2006. *Anais do VII IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, p. 46-50, 2006.

ZHANG, C.; MURAI, S.; BALSAVIAS, E. Road Network Detection by Mathematical Morphology. In: ISPRS Workshop “3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements”, França, 1999. *Anais do ISPRS Workshop “3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements”*, 1999, p. 185 – 200.

ZHANG, T. Y.; SUEN, C. Y. A Fast Parallel Algorithm for Thinning digital Patterns. *Communications of the ACM*, v. 27, n. 3, p. 236 – 239, 1984.

---

# APÊNDICE

---

Nome	Hora	Sensor	Largura (pixels)	Comprimento (pixels)	Rh (m)	Ra	Banda	Longitude (°)	Latitude (°)	Ls (°)	Projeção	Região
PSP_003834_1650	15:14	HIRISE	7040	4381	0,25	1,00	Vermelha	175,50	-14,60	242,60	Equirretangular	Aeolis
E16-01962	13:39	MOC NA	481	979	2,99	1,49	Pancromática	175,25	-14,70	18,77	Sinusoidal	Aeolis
R02-00357	14:40	MOC NA	1024	2052	2,98	1,50	Pancromática	175,22	-15,06	134,17	Sem projeção	Aeolis
R08-02402	14:27	MOC NA	1856	3017	1,50	0,97	Pancromática	175,14	-14,72	249,25	Sem projeção	Aeolis
R13-01467	13:31	MOC NA	2077	2855	1,43	0,47	Pancromática	175,21	-14,84	331,03	Sinusoidal	Aeolis
PSP_002548_1255A	16:00	HIRISE	4069	2779	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	181,80	Equirretangular	Noachis
PSP_002548_1255B	16:00	HIRISE	5582	2621	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	181,80	Equirretangular	Noachis
PSP_002548_1255C	16:00	HIRISE	2840	3011	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	181,80	Equirretangular	Noachis
PSP_003326_1255	15:53	HIRISE	5665	2615	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	217,80	Equirretangular	Noachis
PSP_004038_1255	15:20	HIRISE	5059	3200	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	257,70	Equirretangular	Noachis
PSP_004249_1255	15:11	HIRISE	3616	3448	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	263,10	Equirretangular	Noachis
PSP_005238_1255	14:33	HIRISE	7479	5257	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	310,30	Equirretangular	Noachis
PSP_005383_1255	14:26	HIRISE	5309	4160	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	316,80	Equirretangular	Noachis
PSP_005528_1255	14:20	HIRISE	3000	1432	0,25	1,00	Vermelha	12,90	-54,30	323,20	Equirretangular	Noachis
ESP_013321_1175	15:08	HIRISE	3155	3120	0,50	1,00	Vermelha	3,90	-62,30	275,70	Equirretangular	Noachis
ESP_013992_1170A	14:41	HIRISE	5058	6021	0,25	1,00	Vermelha	44,50	-62,50	307,50	Equirretangular	Noachis
ESP_013992_1170B	14:41	HIRISE	5047	6674	0,25	1,00	Vermelha	44,50	-62,50	307,50	Equirretangular	Noachis
ESP_013992_1170C	14:41	HIRISE	4359	4481	0,25	1,00	Vermelha	44,50	-62,50	307,50	Equirretangular	Noachis
ESP_014020_1150	14:42	HIRISE	5698	5139	0,25	1,00	Vermelha	0,70	-64,80	308,70	Equirretangular	Noachis
ESP_014322_1215	14:38	HIRISE	4026	6950	0,25	1,00	Vermelha	35,40	-58,30	322,30	Equirretangular	Noachis
ESP_013557_1245	14:52	HIRISE	4686	7419	0,25	1,00	Vermelha	39,00	-55,00	287,10	Equirretangular	Noachis
PSP_005659_1335A	14:24	HIRISE	2271	5662	0,50	1,00	Vermelha	36,90	-46,40	328,90	Equirretangular	Noachis
PSP_005659_1335B	14:24	HIRISE	2525	6871	0,50	1,00	Vermelha	36,90	-46,40	328,90	Equirretangular	Noachis
PSP_005659_1335C	14:24	HIRISE	5228	5182	0,50	1,00	Vermelha	36,90	-46,40	328,90	Equirretangular	Noachis
E11-01722	13:52	MOC NA	512	498	5,82	1,01	Pancromática	8,20	-61,40	287,99	Sem Projeção	Noachis
E11-03103	13:48	MOC NA	512	550	5,82	1,01	Pancromática	11,23	-61,52	293,62	Sem Projeção	Noachis
E11-00747	13:55	MOC NA	512	523	5,82	1,01	Pancromática	12,93	-61,35	284,82	Sem Projeção	Noachis
E11-01129	13:53	MOC NA	1024	383	2,91	1,52	Pancromática	16,33	-59,43	286,08	Sem Projeção	Noachis
E11-01527	13:51	MOC NA	512	393	5,81	1,01	Pancromática	19,83	-58,51	287,34	Sem Projeção	Noachis
E11-03844	13:43	MOC NA	512	890	5,82	1,01	Pancromática	22,10	-59,15	297,33	Sem Projeção	Noachis
E11-02963	13:46	MOC NA	512	556	5,82	1,01	Pancromática	22,93	-59,09	292,98	Sem Projeção	Noachis

Nome	Hora	Sensor	Largura (pixels)	Comprimento (pixels)	Rh (m)	Ra	Banda	Longitude (°)	Latitude (°)	Ls (°)	Projeção	Região
E11-00582	13:54	MOC NA	512	590	5,81	1,01	Pancromática	24,65	-58,88	284,17	Sem Projeção	Noachis
E11-01314	13:51	MOC NA	138	537	5,80	1,01	Pancromática	32,11	-57,98	286,68	Sem Projeção	Noachis
E12-01041	13:38	MOC NA	430	546	4,36	1,29	Pancromática	36,76	-59,32	306,48	Sinusoidal	Noachis
R09-03467	14:22	MOC NA	1024	696	2,90	1,52	Pancromática	39,18	-57,17	267,72	Sem Projeção	Noachis
R10-04224	14:08	MOC NA	385	1089	2,91	1,52	Pancromática	9,38	-62,73	285,72	Sinusoidal	Noachis
R11-03714	13:50	MOC NA	448	903	2,91	1,52	Pancromática	36,26	-55,99	304,30	Sinusoidal	Noachis
R10-02844	14:08	MOC NA	486	1159	2,91	1,52	Pancromática	37,40	-56,89	281,23	Sinusoidal	Noachis
R10-04196	14:03	MOC NA	1024	2190	2,90	1,02	Pancromática	36,30	-56,34	285,67	Sem Projeção	Noachis
R10-00382	14:17	MOC NA	492	1128	2,90	1,52	Pancromática	39,43	-57,47	272,25	Sinusoidal	Noachis
S09-01660A	14:12	MOC NA	672	1880	4,41	1,25	Pancromática	36,75	-56,45	269,93	Sem Projeção	Noachis
S09-01660B	14:12	MOC NA	672	1848	4,41	1,25	Pancromática	36,75	-56,45	269,93	Sem Projeção	Noachis
S09-00929A	14:17	MOC NA	672	1756	4,41	1,00	Pancromática	37,91	-56,56	265,39	Sem Projeção	Noachis
S09-00929B	14:17	MOC NA	672	1700	4,41	1,00	Pancromática	37,91	-56,56	265,39	Sem Projeção	Noachis
M10-01206	14:09	MOC NA	363	829	5,55	1,06	Pancromática	316,90	-47,17	260,85	Sinusoidal	Argyre
E14-00400A	13:26	MOC NA	388	834	5,83	1,01	Pancromática	318,16	-47,18	339,47	Sinusoidal	Argyre
E14-00400B	13:26	MOC NA	386	673	5,83	1,01	Pancromática	318,16	-47,18	339,47	Sinusoidal	Argyre
E14-00400C	13:26	MOC NA	304	1185	5,83	1,01	Pancromática	318,16	-47,18	339,47	Sinusoidal	Argyre
S10-01582	13:52	MOC NA	551	252	4,39	1,00	Pancromática	351,36	-58,44	297,27	Sinusoidal	Argyre
S08-02952	14:24	MOC NA	443	529	5,95	0,99	Pancromática	346,05	-54,24	257,68	Sinusoidal	Argyre
R13-02691	13:45	MOC NA	414	590	5,81	1,01	Pancromática	352,33	-57,99	334,68	Sinusoidal	Argyre
R08-02621A	14:40	MOC NA	564	632	4,40	1,07	Pancromática	345,56	-53,53	250,90	Sinusoidal	Argyre
R08-02621B	14:40	MOC NA	500	856	4,40	1,07	Pancromática	345,56	-53,53	250,90	Sinusoidal	Argyre
E13-00271A	13:28	MOC NA	462	316	5,83	1,00	Pancromática	355,48	-52,48	320,78	Sinusoidal	Argyre
E13-00271B	13:28	MOC NA	420	606	5,83	1,00	Pancromática	355,48	-52,48	320,78	Sinusoidal	Argyre
S10-01598	13:46	MOC NA	565	841	2,92	1,51	Pancromática	320,28	-47,40	297,32	Sinusoidal	Argyre
S08-03151	14:18	MOC NA	233	339	4,46	0,99	Pancromática	319,50	-44,69	259,03	Sem Projeção	Argyre
M14-00175A	13:22	MOC NA	349	1144	5,53	1,08	Pancromática	316,93	-48,86	329,22	Sem Projeção	Argyre
M14-00175B	13:22	MOC NA	454	1795	5,53	1,08	Pancromática	316,93	-48,86	329,22	Sem Projeção	Argyre
M12-02214	13:30	MOC NA	482	598	2,77	1,59	Pancromática	315,10	-51,21	305,76	Sinusoidal	Argyre
ESP_012927_1245	15:24	HIRESE	5513	2431	0,25	1,00	Vermelha	318,60	-55,20	256,30	Equirretangular	Argyre
ESP_013204_1260	15:11	HIRESE	1213	1662	0,50	1,00	Vermelha	316,70	-53,80	270,00	Equirretangular	Argyre

Nome	Hora	Sensor	Largura (pixels)	Comprimento (pixels)	Rh (m)	Ra	Banda	Longitude (°)	Latitude (°)	Ls (°)	Projeção	Região
ESP_013310_1200A	15:07	HiRESE	4968	4927	0,50	1,00	Vermelha	303,40	-59,60	275,10	Equirretangular	Argyre
ESP_013310_1200B	15:07	HiRESE	5840	4358	0,50	1,00	Vermelha	303,40	-59,60	275,10	Equirretangular	Argyre
ESP_013626_1245	15:02	HiRESE	4956	3132	0,25	1,00	Vermelha	318,60	-55,20	290,40	Equirretangular	Argyre
ESP_013996_1155	14:42	HiRESE	6695	7250	0,25	1,00	Vermelha	295,70	-64,10	307,60	Equirretangular	Argyre
ESP_014049_1200	14:38	HiRESE	4681	5858	0,25	1,00	Vermelha	287,60	-59,90	310,10	Equirretangular	Argyre
ESP_014259_1230A	14:32	HiRESE	5603	2493	0,25	1,00	Vermelha	313,70	-56,90	319,50	Equirretangular	Argyre
ESP_014259_1230B	14:32	HiRESE	3364	5498	0,25	1,00	Vermelha	313,70	-56,90	319,50	Equirretangular	Argyre
ESP_013520_1180A	14:58	HiRESE	5776	4000	0,25	1,00	Vermelha	330,80	-62,00	285,30	Equirretangular	Argyre
ESP_013520_1180B	14:58	HiRESE	4043	2531	0,25	1,00	Vermelha	330,80	-62,00	285,30	Equirretangular	Argyre
PSP_005596_1245	14:28	HiRESE	2196	864	0,50	1,00	Vermelha	318,50	-55,00	326,20	Equirretangular	Argyre
PSP_005780_1215	14:30	HiRESE	2168	1423	0,25	1,00	Vermelha	335,80	-58,10	334,00	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320A	14:25	HiRESE	2137	1704	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320B	14:25	HiRESE	2497	2820	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320C	14:25	HiRESE	1433	2073	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320D	14:25	HiRESE	1696	2032	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320E	14:25	HiRESE	1477	1440	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320F	14:25	HiRESE	1842	1500	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320G	14:25	HiRESE	1665	1552	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005820_1320H	14:25	HiRESE	749	540	0,25	1,00	Vermelha	321,70	-47,40	335,70	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235A	14:29	HiRESE	6956	2881	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235B	14:29	HiRESE	2625	1361	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235C	14:29	HiRESE	1423	744	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235D	14:29	HiRESE	1328	1277	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235E	14:29	HiRESE	4255	1009	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235F	14:29	HiRESE	4255	1009	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235G	14:29	HiRESE	6876	1559	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235H	14:29	HiRESE	1384	1137	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235I	14:29	HiRESE	3936	1669	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235J	14:29	HiRESE	2053	2652	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235K	14:29	HiRESE	5232	1136	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235L	14:29	HiRESE	4752	2340	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre

Nome	Hora	Sensor	Largura (pixels)	Comprimento (pixels)	Rh (m)	Ra	Banda	Longitude (°)	Latitude (°)	Ls (°)	Projeção	Região
PSP_005846_1235M	14:29	HiRESE	1963	1686	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235N	14:29	HiRESE	3169	2999	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235O	14:29	HiRESE	4056	3368	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235P	14:29	HiRESE	5696	2344	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235Q	14:29	HiRESE	4145	1840	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235R	14:29	HiRESE	3451	2640	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235S	14:29	HiRESE	4367	3137	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235T	14:29	HiRESE	6143	2921	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235U	14:29	HiRESE	3808	1393	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_005846_1235V	14:29	HiRESE	5988	2952	0,25	1,00	Vermelha	333,50	-56,00	336,80	Equirretangular	Argyre
PSP_006163_1345A	14:28	HiRESE	2345	2606	0,25	1,00	Vermelha	316,30	-45,30	349,80	Equirretangular	Argyre
PSP_006163_1345B	14:28	HiRESE	4415	7184	0,25	1,00	Vermelha	316,30	-45,30	349,80	Equirretangular	Argyre
PSP_006163_1345C	14:28	HiRESE	6032	5320	0,25	1,00	Vermelha	316,30	-45,30	349,80	Equirretangular	Argyre
PSP_006163_1345D	14:28	HiRESE	6863	5531	0,25	1,00	Vermelha	316,30	-45,30	349,80	Equirretangular	Argyre
PSP_006176_1225A	14:34	HiRESE	4195	2640	0,25	1,00	Vermelha	323,60	-57,10	350,40	Equirretangular	Argyre
PSP_006176_1225B	14:34	HiRESE	2616	2100	0,25	1,00	Vermelha	323,60	-57,10	350,40	Equirretangular	Argyre
PSP_006176_1225C	14:34	HiRESE	2470	1458	0,25	1,00	Vermelha	323,60	-57,10	350,40	Equirretangular	Argyre
PSP_005397_1270A	14:29	HiRESE	6661	5196	0,25	1,00	Vermelha	351,50	-52,70	317,40	Equirretangular	Argyre
PSP_005397_1270B	14:29	HiRESE	6425	3552	0,25	1,00	Vermelha	351,50	-52,70	317,40	Equirretangular	Argyre
PSP_005397_1270C	14:29	HiRESE	9058	2497	0,25	1,00	Vermelha	351,50	-52,70	317,40	Equirretangular	Argyre
PSP_005397_1270D	14:29	HiRESE	7567	2136	0,25	1,00	Vermelha	351,50	-52,70	317,40	Equirretangular	Argyre
PSP_005397_1270E	14:29	HiRESE	7669	3297	0,25	1,00	Vermelha	351,50	-52,70	317,40	Equirretangular	Argyre
E10-00563	14:06	MOC NA	326	262	2,92	1,51	Pancromática	140,23	-46,87	265,98	Sinusoidal	Eridania
E11-04510	13:36	MOC NA	503	218	4,37	1,27	Pancromática	146,70	-53,06	300,81	Sinusoidal	Eridania
E10-04027	14:02	MOC NA	672	1118	4,53	1,01	Pancromática	125,00	-62,67	278,89	Sem projeção	Eridania
E11-01652	13:46	MOC NA	512	850	5,80	1,02	Pancromática	149,43	-53,74	287,74	Sem projeção	Eridania
E09-02016	14:16	MOC NA	336	948	8,75	1,01	Pancromática	122,70	-54,12	259,51	Sem projeção	Eridania
E11-01664	13:53	MOC NA	512	350	5,79	1,01	Pancromática	123,01	-61,88	287,79	Sem projeção	Eridania
E11-02785	13:46	MOC NA	512	528	5,80	1,01	Pancromática	121,15	-58,48	292,18	Sem projeção	Eridania
E11-02787	13:45	MOC NA	512	619	5,81	1,02	Pancromática	121,45	-56,97	292,18	Sem projeção	Eridania
E11-02045	13:40	MOC NA	512	565	5,84	1,01	Pancromática	122,10	-40,24	289,04	Sem projeção	Eridania

Nome	Hora	Sensor	Largura (pixels)	Comprimento (pixels)	Rh (m)	Ra	Banda	Longitude (°)	Latitude (°)	Ls (°)	Projeção	Região
R09-03051	14:23	MOC NA	337	544	4,34	1,02	Pancromática	120,95	-57,29	266,28	Sinusoidal	Eridania
R09-01707	14:28	MOC NA	610	328	2,90	1,53	Pancromática	120,85	-57,41	261,74	Sinusoidal	Eridania
R09-04267A	14:16	MOC NA	512	1356	5,81	1,01	Pancromática	177,40	-53,48	270,71	Sem projeção	Eridania
R09-04267B	14:16	MOC NA	512	1682	5,81	1,01	Pancromática	177,40	-53,48	270,71	Sem projeção	Eridania
R12-00250	13:43	MOC NA	459	1568	2,92	1,51	Pancromática	123,88	-50,69	309,59	Sinusoidal	Eridania
R12-02283	13:40	MOC NA	432	1344	2,92	1,52	Pancromática	125,90	-50,75	319,06	Sinusoidal	Eridania
R10-04120	14:07	MOC NA	502	1128	2,90	1,52	Pancromática	123,60	-61,60	285,52	Sinusoidal	Eridania
R11-02327	13:50	MOC NA	229	658	8,70	1,02	Pancromática	175,73	-52,57	298,55	Sinusoidal	Eridania
R10-03758	14:10	MOC NA	456	1220	2,90	1,50	Pancromática	177,73	-63,77	284,16	Sinusoidal	Eridania
R10-02441	14:15	MOC NA	479	1053	2,90	1,51	Pancromática	178,96	-64,49	279,70	Sinusoidal	Eridania
R10-03959A	14:10	MOC NA	426	1344	2,89	1,51	Pancromática	165,96	-63,74	284,82	Sinusoidal	Eridania
R10-03959B	14:10	MOC NA	416	1524	2,89	1,51	Pancromática	165,96	-63,74	284,82	Sinusoidal	Eridania
R10-04815	14:06	MOC NA	560	179	2,89	1,51	Pancromática	160,31	-63,14	287,98	Sinusoidal	Eridania
R10-03563A	14:12	MOC NA	441	1407	2,89	1,50	Pancromática	161,65	-64,22	283,55	Sinusoidal	Eridania
R10-03563B	14:12	MOC NA	449	1260	2,89	1,50	Pancromática	161,65	-64,22	283,55	Sinusoidal	Eridania
R11-02811	13:51	MOC NA	512	1711	5,80	1,02	Pancromática	151,68	-56,03	299,83	Sem projeção	Eridania
R13-01492	13:38	MOC NA	471	1422	2,91	1,53	Pancromática	150,70	-47,09	331,07	Sinusoidal	Eridania
PSP_005510_1290	14:25	HiRISE	4764	3109	0,50	1,00	Vermelha	145,50	-50,60	322,40	Equirretangular	Eridania
ESP_023021_1160A	14:30	HiRISE	5559	3441	0,25	1,00	Vermelha	142,20	-63,90	317,10	Equirretangular	Eridania
ESP_023021_1160B	14:30	HiRISE	5199	3961	0,25	1,00	Vermelha	142,20	-63,90	317,10	Equirretangular	Eridania
ESP_023021_1160C	14:30	HiRISE	5799	4821	0,25	1,00	Vermelha	142,20	-63,90	317,10	Equirretangular	Eridania
ESP_023021_1160D	14:30	HiRISE	5103	4064	0,25	1,00	Vermelha	142,20	-63,90	317,10	Equirretangular	Eridania
ESP_023021_1160E	14:30	HiRISE	2976	5343	0,25	1,00	Vermelha	142,20	-63,90	317,10	Equirretangular	Eridania
ESP_023021_1160F	14:30	HiRISE	8819	4332	0,25	1,00	Vermelha	142,20	-63,90	317,10	Equirretangular	Eridania
ESP_021874_1175A	15:13	HiRISE	5999	4224	0,25	1,00	Vermelha	136,40	-62,20	262,80	Equirretangular	Eridania
ESP_021874_1175B	15:13	HiRISE	6562	6720	0,25	1,00	Vermelha	136,40	-62,20	262,80	Equirretangular	Eridania
ESP_021874_1175C	15:13	HiRISE	5486	2656	0,25	1,00	Vermelha	136,40	-62,20	262,80	Equirretangular	Eridania
ESP_021939_1170	15:10	HiRISE	5233	3840	0,25	1,00	Vermelha	162,00	-62,90	266,00	Equirretangular	Eridania
ESP_021940_1205A	15:07	HiRISE	5610	2059	0,25	1,00	Vermelha	133,80	-59,10	266,00	Equirretangular	Eridania
ESP_021940_1205B	15:07	HiRISE	6310	5209	0,25	1,00	Vermelha	133,80	-59,10	266,00	Equirretangular	Eridania
ESP_021940_1205C	15:07	HiRISE	5456	3225	0,25	1,00	Vermelha	133,80	-59,10	266,00	Equirretangular	Eridania

Nome	Hora	Sensor	Largura (pixels)	Comprimento (pixels)	Rh (m)	Ra	Banda	Longitude (°)	Latitude (°)	Ls (°)	Projeção	Região
ESP_014121_1180	14:38	HIRISE	5918	3758	0,25	1,00	Vermelha	122,40	-61,70	313,30	Equirretangular	Eridania
PSP_006248_1235	14:34	HIRISE	3663	4497	0,25	1,00	Vermelha	157,50	-56,00	353,20	Equirretangular	Eridania
PSP_004086_1180	15:25	HIRISE	5248	3872	0,25	1,00	Vermelha	145,10	-61,90	255,10	Equirretangular	Eridania
PSP_004086_1180A	15:25	HIRISE	4901	4879	0,25	1,00	Vermelha	145,10	-61,90	255,10	Equirretangular	Eridania
PSP_004086_1180B	15:25	HIRISE	5279	5365	0,25	1,00	Vermelha	145,10	-61,90	255,10	Equirretangular	Eridania
E12-01277A	13:27	MOC NA	512	1609	5,84	1,01	Pancromática	65,48	-41,15	307,63	Sem projeção	Hellas
E12-01277B	13:27	MOC NA	512	1928	5,84	1,01	Pancromática	65,48	-41,15	307,63	Sem projeção	Hellas
E12-01277C	13:27	MOC NA	512	1461	5,84	1,01	Pancromática	65,48	-41,15	307,63	Sem projeção	Hellas
E10-02468	13:58	MOC NA	512	1097	5,81	1,02	Pancromática	60,70	-44,69	273,23	Sem projeção	Hellas
E10-02820	13:56	MOC NA	326	502	5,81	1,02	Pancromática	64,60	-45,16	274,51	Sem projeção	Hellas
E11-01296	13:53	MOC NA	512	1689	5,77	1,02	Pancromática	61,55	-60,53	286,63	Sem projeção	Hellas
E11-00727A	13:57	MOC NA	512	1791	5,78	1,01	Pancromática	70,73	-62,48	284,72	Sem projeção	Hellas
E11-00727B	13:57	MOC NA	512	2184	5,78	1,01	Pancromática	70,73	-62,48	284,72	Sem projeção	Hellas
E11-00727C	13:57	MOC NA	512	1812	5,78	1,01	Pancromática	70,73	-62,48	284,72	Sem projeção	Hellas
E12-01752	13:36	MOC NA	672	1287	4,35	1,01	Pancromática	77,20	-59,74	310,02	Sem projeção	Hellas
E10-00012	14:17	MOC NA	512	1152	5,81	1,01	Pancromática	78,43	-59,92	263,49	Sem projeção	Hellas
E10-04932	13:57	MOC NA	512	1012	5,79	1,02	Pancromática	90,83	-59,59	282,14	Sem projeção	Hellas
E10-01933	14:07	MOC NA	672	1593	4,36	1,01	Pancromática	100,91	-58,51	271,23	Sem projeção	Hellas
E11-00173	14:00	MOC NA	512	1688	5,78	1,01	Pancromática	108,53	-64,38	282,75	Sem projeção	Hellas
E12-00190A	13:30	MOC NA	369	1009	4,40	1,26	Pancromática	119,21	-38,30	302,08	Sinusoidal	Hellas
E12-00190B	13:30	MOC NA	419	807	4,40	1,26	Pancromática	119,21	-38,30	302,08	Sinusoidal	Hellas
E10-00578	14:18	MOC NA	456	804	4,36	1,01	Pancromática	116,08	-64,56	266,02	Sinusoidal	Hellas
E10-02444	14:02	MOC NA	512	1245	5,81	1,01	Pancromática	119,78	-53,93	273,12	Sem projeção	Hellas
E11-01270	13:51	MOC NA	512	1312	5,79	1,02	Pancromática	118,01	-57,82	286,53	Sem projeção	Hellas
E13-01622	13:23	MOC NA	512	1768	5,82	1,02	Pancromática	65,50	-41,27	329,28	Sem projeção	Hellas
E13-00975	13:23	MOC NA	354	918	4,36	1,28	Pancromática	66,23	-41,22	325,28	Sinusoidal	Hellas
R12-01589	13:50	MOC NA	672	1412	4,36	1,01	Pancromática	76,41	-62,24	316,21	Sem projeção	Hellas
R12-01264	13:49	MOC NA	345	957	5,83	1,01	Pancromática	113,01	-60,60	314,38	Sinusoidal	Hellas
S09-01218	14:17	MOC NA	512	1090	5,87	1,00	Pancromática	115,95	-59,96	267,20	Sem projeção	Hellas
PSP_006264_1420	14:28	HIRISE	3208	5081	0,25	1,00	Vermelha	77,50	-37,60	353,90	Equirretangular	Hellas
ESP_014399_1220	14:34	HIRISE	1668	2401	0,50	1,00	Vermelha	92,50	-57,80	325,60	Equirretangular	Hellas

Nome	Hora	Sensor	Largura (pixels)	Comprimento (pixels)	Rh (m)	Ra	Banda	Longitude (°)	Latitude (°)	Ls (°)	Projeção	Região
ESP_014176_1155A	14:34	HIRISE	3078	6191	0,25	1,00	Vermelha	60,30	-64,30	315,80	Equirretangular	Hellas
ESP_014176_1155B	14:34	HIRISE	2676	7526	0,25	1,00	Vermelha	60,30	-64,30	315,80	Equirretangular	Hellas
ESP_014176_1155C	14:34	HIRISE	4861	5500	0,25	1,00	Vermelha	60,30	-64,30	315,80	Equirretangular	Hellas
ESP_014176_1155D	14:34	HIRISE	6924	3550	0,25	1,00	Vermelha	60,30	-64,30	315,80	Equirretangular	Hellas
ESP_014176_1155E	14:34	HIRISE	3009	5169	0,25	1,00	Vermelha	60,30	-64,30	315,80	Equirretangular	Hellas
ESP_014176_1155F	14:34	HIRISE	6048	3184	0,25	1,00	Vermelha	60,30	-64,30	315,80	Equirretangular	Hellas
ESP_014108_1200A	14:37	HIRISE	4448	6998	0,25	1,00	Vermelha	116,80	-59,50	312,70	Equirretangular	Hellas
ESP_014108_1200B	14:37	HIRISE	6346	4774	0,25	1,00	Vermelha	116,80	-59,50	312,70	Equirretangular	Hellas
ESP_014070_1170	14:43	HIRISE	6497	2175	0,25	1,00	Vermelha	75,90	-62,60	311,00	Equirretangular	Hellas
ESP_014069_1180	14:39	HIRISE	7599	4479	0,25	1,00	Vermelha	102,10	-61,60	311,00	Equirretangular	Hellas
ESP_014056_1180	14:40	HIRISE	5280	3072	0,25	1,00	Vermelha	97,10	-61,80	310,40	Equirretangular	Hellas
ESP_014004_1180	14:41	HIRISE	7070	5998	0,25	1,00	Vermelha	76,70	-61,60	308,00	Equirretangular	Hellas
ESP_013991_1160	14:43	HIRISE	5472	3889	0,25	1,00	Vermelha	72,30	-63,80	307,40	Equirretangular	Hellas
ESP_013965_1165	14:43	HIRISE	7298	6000	0,25	1,00	Vermelha	62,00	-63,20	306,20	Equirretangular	Hellas