



**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**ÉRICO FERNANDO DE OLIVEIRA MARTINS**

**ATUALIZAÇÃO DE MALHA RODOVIÁRIA EM  
ÁREA RURAL VIA INTEGRAÇÃO DE DADOS  
GEOESPACIAIS E SNAKES DE REDE**



**Presidente Prudente**  
**2017**

**ÉRICO FERNANDO DE OLIVEIRA MARTINS**

**ATUALIZAÇÃO DE MALHA RODOVIÁRIA EM  
ÁREA RURAL VIA INTEGRAÇÃO DE DADOS  
GEOESPACIAIS E SNAKES DE REDE**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas. Área de concentração em aquisição, análise e representação de informações espaciais.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

## FICHA CATALOGRÁFICA

M342a Martins, Érico Fernando de Oliveira.  
Atualização de malha rodoviária em área rural via integração de dados geoespaciais e snakes de rede / Érico Fernando de Oliveira Martins. - Presidente Prudente : [s.n.], 2017  
153 f.

Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Inclui bibliografia

1. Extração de rodovias. 2. Inferência de mapas de rodovias. 3. Snakes de rede. I. Dal Poz, Aluir Porfírio. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: ATUALIZAÇÃO DE MALHA RODOVIÁRIA EM ÁREA RURAL VIA INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOESPACIAIS E SNAKES DE REDE

**AUTOR: ÉRICO FERNANDO DE OLIVEIRA MARTINS**

**ORIENTADOR: ALUIR PORFIRIO DAL POZ**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:



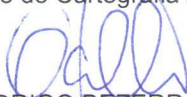
Prof. Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. MAURICIO GALO  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. ERIVALDO ANTONIO DA SILVA  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente



Prof. Dr. RODRIGO BEZERRA DE ARAUJO GALLIS  
Instituto de Geografia / Universidade Federal de Uberlândia



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA  
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Presidente Prudente, 25 de agosto de 2017

## DEDICATÓRIA

*Dedico esta tese aos meus pais, José Afonso e Marlene,  
minha esposa, Simone, e minha filha, Cecília Fernanda.*

## AGRADECIMENTOS

Esta tese é fruto de um esforço pessoal e um apoio coletivo. Agradeço imensamente a todos os envolvidos neste processo de qualificação, em especial as pessoas citadas abaixo.

À minha família pela compreensão nos momentos de ausência. A minha esposa, Simone, pelo esforço em manter nossa família feliz e em harmonia. A minha filha, Cecília Fernanda, pelas palavras de apoio e carinho. Aos meus pais, José Afonso e Marlene, pelos ensinamentos e educação proporcionados ao longo da vida. Ao meu irmão Ariel Fernando por me acompanhar em boa parte da jornada. Às minhas sobrinhas Thalita Fernanda e Thainara Fernanda pelas risadas. Ao meu primo Fernando e toda a família pelo acolhimento.

Aos amigos de pesquisa e café Adilson, Deroco, Henrique, Luiz, Mariana, Prol, Raquel, Samara, Vanessa e todos os colegas do PPGCC.

À família Jerez, Gabriel, Felipe, Pedro, Ana, Mateus por tudo feito.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP), e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) pela infraestrutura fornecida, e aos seus professores pelas valiosas discussões e compartilhamento do conhecimento.

À Universidade do Estado de Mato Grosso (Unemat) por viabilizar um período de qualificação aos seus professores e por tudo que me permitiu desenvolver como profissional.

Aos amigos Rodrigo Bruno Zanin e Marion Machado Cunha pelas reflexões a respeito da pesquisa e da atuação profissional para construir uma universidade mais forte.

Ao meu primeiro e grande orientador na vida acadêmica, Wilson Santana da Cunha, obrigado pelo incentivo e confiança.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso - FAPEMAT, pela concessão da bolsa de doutorado, processo n 231463/2013.

Ao Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, pelo tempo dedicado e conhecimento compartilhado nesta jornada, seu apoio e orientações foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz (UNESP), Prof. Dr. Mauricio Galo (UNESP), Prof. Dr. Erivaldo Antonio da Silva (UNESP), Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis (UFU), Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita (UFPR), pela disposição em avaliar este trabalho.

## RESUMO

Os processos convencionais de extração de rodovias em imagens digitais não costumam fazer uso de informações a priori e normalmente não há uma preocupação a respeito da padronização necessária para que os resultados das extrações sejam utilizados em Infraestruturas de Dados Espaciais (IDE). Por consequência, os resultados dessas extrações acabam sendo geometricamente robustos, porém fragmentados em relação ao contexto e a seu padrão de estrutura, ou seja, necessitarão de um grande esforço do operador humano para que possam se tornar elegíveis à IDE, contrariando uma das principais motivações para o desenvolvimento de métodos (semi-) automáticos de extração, que é desonerar o operador humano de tarefas repetitivas e enfadonhas. Neste contexto a hipótese motivadora desta pesquisa levanta a questão: “adaptando processos clássicos de extração de rodovias para a integração de dados geoespaciais preexistentes, será possível apresentar um método para atualização sistemática de malha rodoviária em área rural, que seja capaz de preservar informações e estruturas preexistentes?”. Como resposta é apresentado aqui um método para a atualização da malha rodoviária em formato vetorial, advinda de bases de dados cartográficas elaboradas segundo uma IDE, por meio da integração de diferentes tipos de dados, preservando sua integridade. No decorrer das três etapas em que está organizado o método o arquivo vetorial sofrerá uma série de modificações geométricas, configuradas em distintos processos, começando com uma confluência vetor-para-vetor com o mapa de rodovias inferido a partir de trajetórias de deslocamento com objetivo de identificar ramos ausentes na malha e agregá-los (Expansão da Malha); seguida de uma confluência vetor-para-vetor com os segmentos de eixo de rodovias extraídos de uma imagem sintética obtida a partir das imagens *RapidEye* (Ajuste da Malha Expandida); finalizando com a etapa de refino pela aplicação das *snakes* de redes sobre a malha ajustada e a imagem sintética (Refino da Malha Ajustada) e por fim uma atribuição da componente altimétrica por meio de um Modelo Digital de Superfície, resultando em um arquivo vetorial geometricamente atualizado e expandido para o espaço tridimensional, com estrutura e atributos preservados. Os experimentos realizados demonstraram a robustez do método, com a média do RMSE da malha inicial em 50,86 m, alcançando 18,72 m na primeira etapa do método (expansão da malha), reduzindo para 7,25 m na etapa seguinte (ajuste da malha), e para 3,74 m na etapa final (refino da malha). Assim, o processo finaliza com um RMSE médio de 3,74 m e um desvio-padrão de 2,86 m, que permite o enquadramento da malha resultante no PEC-PCD 1:50.000 classe A, devidamente adequado aos padrões da IDE.

**Palavras-chave:** Fotogrametria, Sensoriamento remoto, Extração de Rodovias, Inferência de mapas de rodovias; *Snakes* de rede .

## ABSTRACT

Conventional road extraction processes in digital imagery do not usually make use of a priori information and there is usually no concern about the standardization required for extraction results to be used in Spatial Data Infrastructures (SDI). As a result, these extractions turn out to be geometrically robust but fragmented in relation to the context and their structure pattern, that is, they will require a great effort from the human operator so that they can become eligible for SDI, contrary to one of the main motivations for the development of (semi) automatic extraction methods, which is to deprive the human operator of repetitive and tedious tasks. In this context the motivating hypothesis of this *research* raises the question: "adapting classic processes of road extraction for the integration of preexisting geospatial data, it will be possible to present a method for systematic updating of road network in rural area, which is able to preserve preexisting information and structures? ". A method for updating the road network in vector format from cartographic databases elaborated according to an SDI is presented here, through the integration of different types of data, preserving its integrity. During the three stages in which the method is organized the vector file will undergo a series of geometric modifications, configured in different processes, starting with a vector-to-vector conflation with the road map inferred from displacement paths with the objective of identify missing branches in the mesh and aggregate them (Mesh Expansion); followed by vector-to-vector conflation with the segments of road axes extracted from a synthetic image obtained from the RapidEye (Expanded Mesh Adjustment) images; finishing with the refining step by applying the network snakes on the adjusted mesh and the synthetic image (Refining the Adjusted Mesh) and finally an assignment of the altimetric component through a Digital Surface Model, resulting in a vector file geometrically updated and expanded for the three-dimensional space with preserved structure and attributes. The experiments showed the robustness of the method, with the average RMSE of the initial mesh in 50.86 m, reaching 18.72 m in the first step of the method (mesh expansion), reducing to 7.25 m in the next step (mesh adjustment), and to 3.74 m in the final step (mesh refining). Thus, the process ends with an average RMSE of 3.74 m and a standard deviation of 2.86 m, which allows framing of the resulting mesh in the 1: 50,000 Class A PEC-PCD, duly adapted to SDI standards.

Keywords: Photogrammetry, Remote Sensing, Road Network, Road Extraction, Road Map Inference; Network Snakes.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição temporal da produção científica no tema "road extraction".	19
Figura 2. Representação de uma estrutura de grade regular.	26
Figura 3. Efeito da visão em (a) perspectiva e (b) ortogonal.	28
Figura 4. Princípio da ortorretificação (a) direta e (b) indireta.	29
Figura 5. Representação de feições usando modelo de dados vetorial de (a) pontos, (b) linhas poligonais e (c) polígonos.	31
Figura 6. Recorte de um arquivo GPX.	36
Figura 7. Componentes da INDE.	38
Figura 8. Distribuição das responsabilidades em favor da INDE.	38
Figura 9. Categorias de informação geográfica do Espaço Geográfico Brasileiro.	39
Figura 10. Diagrama de Classe simplificado.	40
Figura 11. Relação de atributos da Classe Trecho Rodoviário.	41
Figura 12. Regras de aquisição de geometria e atributos da classe Trecho Rodoviário.	42
Figura 13. Imagem de 256 x 256 pixels com impressão digital (a) original e (b) suavizada por Coherence Enhancing Anisotropic Diffusion.	50
Figura 14. (a) Perfil AB perpendicular à linha ( $2w, 1$ ) e (b) seu comportamento assimétrico.	51
Figura 15. Perfil transversal à linha num ponto p modelado através da expansão de Taylor.	53
Figura 16. (a) Pontos sementes para criação de clusters e (b) conexão dos centroides gerados.	55
Figura 17. (a) Conjunto de trajetórias (b) convertidas para uma estimativa de densidade e (c) limiarizada para (d) extração do eixo.	56
Figura 18. (a) Destaque da trajetória candidata. (b) Atribuição de peso as arestas da trajetória de referência. (d) Resultado final com supressão das arestas.	57
Figura 19. Exemplo de conflação R2R entre (a) a imagem e o (b) mapa e o (c) resultado.	60
Figura 20. Caso de conflação V2V (a) Representação geométrica da feição (b) Interação entre as tabelas de atributos das feições.	61
Figura 21. Caso de conflação V2V com ambiguidade. a) Representação geométrica da feição b) Iteração entre as tabelas de atributos das feições	62
Figura 22. (a) Antes e (b) depois da conflação V2R.	63
Figura 23. Imagens sintéticas contendo (a) feições lineares e (b) limitadas por bordas.	65
Figura 24. Regiões delineadas com snakes tradicionais: (a) inicialização (azul), (b) resultado (vermelho) e (c) ampliação do retângulo branco em destaque.	69

Figura 25. Estrutura em grafo de dois contornos formando uma rede. ....	70
Figura 26. Grafo da topologia de uma rede de contornos. ....	71
Figura 27. (a) Eixo de referência em vermelho e trajetórias. (b) Destaque das trajetórias. ....	83
Figura 28. Fluxograma detalhando as três etapas do método proposto.....	85
Figura 29. (a) Recorte de imagem com rodovias em área rural. (b) Vetor de referência descrevendo os eixos das rodovias. (c) Eixos no arquivo vetorial IBGE a ser atualizado.....	86
Figura 30. Áreas com aceiros, curvas de nível e vias sazonais no entorno das rodovias.....	87
Figura 31. (a,b) Trajetórias GPS e (c) eixo médio inferido a partir das trajetórias. ....	88
Figura 32. (a) Correspondência definida entre a malha inferida e a pré-existente. (b) Resultado da transformação rubber-sheeting. (c) Acréscimo de ramo na malha expandindo-a. ....	88
Figura 33. (a) Imagem sintética. (b) Malha de referência obtida por Steger. (c) Malha a ser ajustada e malha de referência. (d) Correspondência estabelecida entre as malhas por rubber-sheeting. (e, f) Resultado da conflação por rubber-sheeting. ....	90
Figura 34. Processo para aproximação da resposta do asfalto a resposta do solo exposto. ....	91
Figura 35. (a) Inicialização das snakes de rede e (b) finalização do processo. ....	91
Figura 36. (a) Malha tridimensional sobreposta na imagem e (b) no espaço 3D.....	92
Figura 37. Esquema conceitual dos tipos de classificação do eixo extraído. ....	93
Figura 38. Fluxograma do método de inferência do eixo das trajetórias GPS. ....	95
Figura 39. (a) Trajetórias GPS de uma BDT com destaque (retângulo vermelho) para (b) uma região de cruzamento que será utilizada para ilustrar a evolução do método. (c) Faixas resultantes da operação de buffer. ....	95
Figura 40. Esquema conceitual de trajetórias (a) sem erro e (b) com erro nos dois sentidos. .	96
Figura 41. (a) Dissolução dos polígonos e (b) remoção de buracos (polígonos internos). ....	97
Figura 42. (a) Fragmentos resultantes da erosão (destaque em vermelho) e (b) sua remoção. .	98
Figura 43. (a) Polígono original e (b) simplificado por Douglas-Peucker. ....	98
Figura 44. (a) Polígono original e (b) após a generalização proposta. ....	99
Figura 45. (a) Diagrama de Voronoi confeccionado e (b) arestas filtradas.....	99
Figura 46. (a) Inconsistências geométricas e topológicas e sua (b) correção. (c) Eixo inferido e sobreposto em imagem da base de dados Microsoft Bing.....	100
Figura 47. (a) Quadro completo da imagem RapidEye em composição RGB com destaque em vermelho para o (b) recorte com rodovias de solo exposto e asfalto e suas respostas nas bandas (c) azul, (d) verde, (e) vermelho, (f) red edge e (g) NIR. ....	101
Figura 48. (a) Perfil das rodovias e (b) suas respectivas respostas nas bandas: azul (linha azul), verde (linha verde), vermelha (linha vermelha), red edge (linha cinza) e NIR (linha preta). .	102

Figura 49. (a,d,g) Recortes da composição RGB, (b,e,h) banda red edge e (c,f,i) $sub_{red\ edge}$ .	103
Figura 50. Fluxograma do processo de extração de rodovias em imagens RapidEye 3A.....	104
Figura 51. Recortes de imagens RapidEye coberturas (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014. .....	104
Figura 52. Resultado do $sub_{red\ edge}$ nas coberturas (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014. ..	105
Figura 53. Limiarização das $sub_{red\ edge}$ coberturas (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014..	106
Figura 54. (a) Imagem sintética criada a partir das $sub_{red\ edge}$ e (b) suavizada por um filtro anisotrópico CED. ....	106
Figura 55. Resultado do detector de linhas de Steger para (a) linhas escuras e (b) linhas claras. .....	107
Figura 56. Resultados da filtragem de falsos positivos das detecções para (a) linhas escuras e (b) linhas claras.....	107
Figura 57. (a) Integração das linhas e (b) resultado da remoção manual de falsos positivos.	108
Figura 58. Trajetórias para experimentos do método: (a) CTR1 em cenário urbano e (b) CTR2, (c) CTR5 e (d) CTR6 em cenário rural.....	110
Figura 59. Resultado do método em (a) CTR1, (b) CTR2, (c) CTR5 e (d) CTR6.....	111
Figura 60. Recortes para destaque dos principais erros encontrados nos resultados, como (a) descontinuidade, (b) fusão de vias e (c, d) mudança de características dos cruzamentos.....	112
Figura 61. Recortes dos índices (a) NDVI, (b) SAVI, (c) RVI, (d) RI, (e) CI, (f) BI, (g) SI, (h) BIA e o (i) $Sub_{red\ edge}$ obtidos de uma imagem RapidEye. ....	116
Figura 62. Banda NIR das coberturas (a) 2012, (b) 2013 e (c) 2014 e (d, e, f) respectivas $sub_{red\ edge}$ . ....	118
Figura 63. (a) Imagem sintética resultante, (b) suavizada e (c) com o eixo extraído.....	118
Figura 64. Banda NIR das coberturas (a) 2011, (b) 2012 e (c) 2013; (d, e, f) com respectivas $sub_{red\ edge}$ e a (g) Imagem sintética resultante, (h) suavizada e (i) com o eixo extraído. ....	119
Figura 65. (a) Imagem sintética resultante, (b) suavizada e (c) com o eixo extraído.....	119
Figura 66. Banda NIR das coberturas (a) 2011, (b) 2012 e (c) 2013; (d, e, f) com respectivas $sub_{red\ edge}$ e a (g) Imagem sintética resultante, (h) suavizada e (i) com o eixo extraído. ....	120
Figura 67. Curvas de nível (a) reafirmadas em função da recorrência em várias imagens e (b) parcialmente suprimidas pela não ocorrência em todas as imagens.....	121
Figura 68. Destaque para a fragmentação resultante da aplicação do detector de linhas de Steger. .....	121
Figura 69. Cena completa (a) do resultado do extrator de linhas de Steger e (b) filtragem geométrica dos ruídos por critérios de comprimento mínimo e curvatura máxima. ....	121

Figura 70. Cena 2 com (a) segmentos dos eixos das rodovias extraídos da imagem sintética e (b) eixo de referência para avaliação numérica. ....	122
Figura 71. Cena 3 com (a) Segmentos dos eixos das rodovias extraídos da imagem sintética e (b) eixo de referência para avaliação numérica. ....	123
Figura 72. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) conflação entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via Steger; (h) conflação entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refino via snakes de redes. ....	125
Figura 73. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) conflação entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via Steger; (h) conflação entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refino via snakes de redes. ....	126
Figura 74. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) conflação entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via Steger; (h) conflação entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refino via snakes de redes. ....	128
Figura 75. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) conflação entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via Steger; (h) conflação entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refino via snakes de redes. ....	129
Figura 76. Resultado do detector de linhas de Steger em regiões de cruzamento (a,b) e segmentos ruidosos (c,d). ....	131
Figura 77. Relações (links) estabelecidas entre as malhas por rubber-sheeting na conflação. ....	132
Figura 78. Eixos de entrada (vermelho escuro pontilhado) e resultado do refino por snakes de redes (vermelho claro). ....	132
Figura 79. Malhas ajustadas acrescidas da altimetria e visualizadas em ambiente 3D no QGis. ....	132
Figura 80. Gráfico do RMSE da malha IBGE ao final de cada etapa do método. ....	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção por pesquisador no tema “extração de rodovias”.	20
Tabela 2. Distribuição por país da produção no tema “extração de rodovias”	20
Tabela 3. Indicadores numéricos da qualidade dos SRTM.	78
Tabela 4. Indicadores para a avaliação da qualidade posicional das imagens RapidEye 3A.	80
Tabela 5. Valores praticados na comercialização de imagens de média resolução.	81
Tabela 6. Indicadores numéricos da qualidade dos arquivos TRECHO_RODOVIARIO.	82
Tabela 7. Indicadores baseados nas discrepâncias entre as trajetórias e o eixo de referência.	84
Tabela 8. Parâmetros utilizados nos experimentos do processo proposto.	110
Tabela 9. Indicadores quantitativos da qualidade dos mapas de rodovia inferidos (MI).	112
Tabela 10. Resultados alcançados pelo método proposto aplicado no CTR1.	114
Tabela 11. Resultados do método de Biagioni e Eriksson’s (2012) aplicado no CTR1.	114
Tabela 12. Resultados do método de Qiu e Wang (2016) aplicado no CTR1.	115
Tabela 13. Resumo dos experimentos realizados em cinco cenas com o processo proposto.	117
Tabela 14. Avaliação quantitativa com indicadores da qualidade e precisão das extrações.	122
Tabela 15. Avaliação numérica dos trechos processados.	124
Tabela 16. Avaliação numérica preliminar dos trechos processados.	134
Tabela 17. Avaliação numérica dos trechos já processados.	134
Tabela 18. RMSE apurado ao final de cada etapa do método.	134
Tabela 19. Desvio Padrão da malha atualizada para enquadramento no PEC-PCD.	136

## LISTA DE SIGLAS

ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
BAI	<i>Built-up Area Index</i>
BDT	Base de Dados de Trajetória
BI	<i>Brightness Index</i>
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CED	<i>Coherence Enhancing anisotropic Diffusion</i>
CGI	<i>Contributed Geographic Information</i>
CI	<i>Color Index</i>
CVF	<i>Curvature Vector Flow</i>
CTR	Conjunto de Trajetórias Rodoviárias
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico
EGB	Espaço Geográfico Brasileiro
EP	Erro Padrão
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
ET	Especificações Técnicas
ET-ADGV	Especificações Técnicas para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
ET-EDGV	Especificações Técnicas para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais
ET-PCDG	Especificações Técnicas para dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FGDC	<i>Federal Geographic Data Committee</i>
GDAL	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i>
GGVF	<i>Geodetic GVF</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GPX	<i>GPs eXchange format</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
GVF	<i>Gradient Vector Flow</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Infraestrutura de Dados Espaciais
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRE	<i>Index Road Extraction</i>
IfSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
ITS	<i>Intelligent Transport System</i>
KDE	<i>Kernel Density Estimators</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LBS	<i>Location-Based Service</i>
MAC	<i>Magnetostatic Active Contour</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MI	Mapa de rodovias Inferidas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MR	Mapa de rodovias de Referência
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDBI	<i>Nomalised Difference Built-up Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
R2R	<i>Raster para Raster</i>
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RANSAC	<i>Random Sample Consensus</i>
RI	<i>Redness Index</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Base de Dados
SI	<i>Saturation Index</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
UIC	<i>University of Illinois at Chicago</i>

USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
V2R	<i>Vetor para raster</i>
V2V	<i>Vetor para vetor</i>
VGI	<i>Volunteered Geographic Information</i>
WGS-84	<i>World Geodetic System-1984</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Considerações iniciais.....	18
1.2	Hipótese e objetivos.....	22
1.3	Potencial de contribuição da solução proposta.....	23
1.4	Estrutura da tese.....	23
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1	Dados Geoespaciais.....	25
2.1.1	Produtos Fotogramétricos.....	25
2.1.2	Crowdsourcing de Dados Geoespacial.....	32
2.1.3	Normatizações dos Dados Geoespaciais.....	36
2.2	Processamento de Dados Geoespaciais.....	44
2.2.1	Extração de Feições.....	44
2.2.2	Inferência de Mapas.....	53
2.2.3	Conflação de Feições.....	57
2.3	Contorno Ativo Paramétrico.....	63
2.3.1	Snakes Tradicional.....	64
2.3.2	Snakes de Rede.....	69
3	MATERIAIS E MÉTODO.....	75
3.1	Recursos Materiais.....	75
3.1.1	Modelo de Elevação SRTM.....	77
3.1.2	Ortofoto RapidEye 3A.....	78
3.1.3	Arquivos Vetoriais do IBGE na Escala 1:250.000.....	82
3.1.4	Trajetórias GPS.....	82
3.2	Método Proposto.....	84
3.2.1	Expansão da Malha Preexistente.....	86
3.2.2	Ajuste da Malha Expandida.....	89
3.2.3	Refino da Malha Ajustada.....	90
3.2.4	Avaliação dos Resultados.....	92
3.3	Processos Complementares Propostos.....	94
3.3.1	Inferência do mapa de rodovias em trajetórias GPS.....	94
3.3.2	Extração do eixo das rodovias em imagens RapidEye.....	100
4	EXPERIMENTOS.....	109

4.1	Experimentos dos Processos Complementares Propostos .....	109
4.1.1	Experimentos de inferência do mapa de rodovias em trajetórias GPS.....	109
4.1.2	Experimentos de extração do eixo das rodovias em imagens RapidEye.....	115
4.2	Experimentos do Método Proposto.....	123
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	137
	REFERÊNCIAS .....	139

## 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais que permeiam esta tese, a contextualização científica da pesquisa, a hipótese motivadora do trabalho e os objetivos almejados. Por fim, é apresentada uma breve descrição da estrutura da tese para guiar o leitor.

### 1.1 Considerações iniciais

Estima-se que mais de 60% do transporte de cargas no Brasil faz uso das rodovias, movimentando uma frota de 1,17 milhões de caminhões em uma malha de 1,7 milhões de quilômetros mapeados (ANTT, 2009). Este cenário não é uma exclusividade brasileira pois a malha rodoviária é a principal via de transporte de pessoas e cargas em vários países, tornando-a uma feição de importância estratégica para essas nações. Por consequência, o setor público e a iniciativa privada necessitam constantemente de informações a respeito desta malha, fomentando uma demanda contínua por dados cartográficos atualizados.

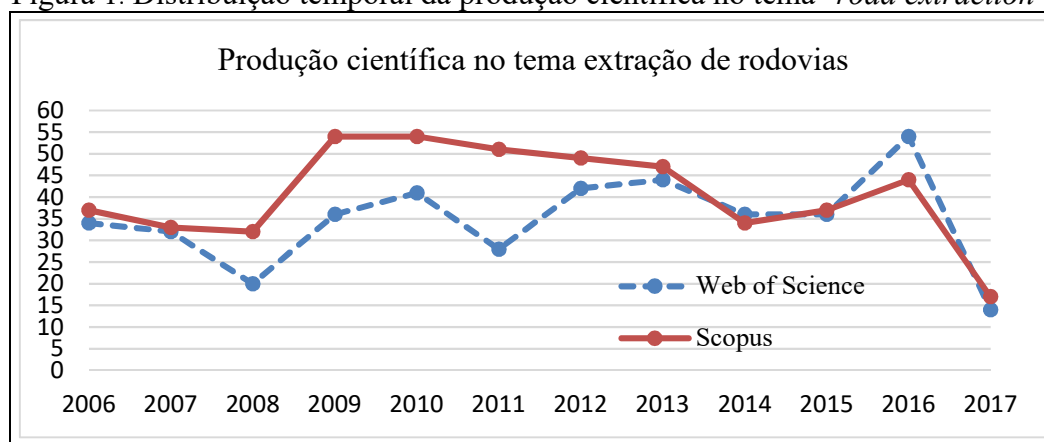
Os processos de mapeamento de rodovias inicialmente exigiam um intenso e dispendioso trabalho de campo, obrigando as equipes de mapeamento a percorrer o trecho a ser mapeado tornando o trabalho lento, potencialmente perigoso e propenso à falhas, já que trechos de rodovias legitimamente trafegáveis poderiam não ser percebidos na malha total. Posteriormente, com o desenvolvimento dos sensores de imageamento, dados advindos de plataformas aéreas e orbitais começaram a ser utilizados de forma a reduzir a exigência de ida à campo, restringindo esta ação somente aos trechos nos quais dúvidas sobre trafegabilidade pudesse existir (trechos de falsos positivos ou falsos negativos nas imagens). No entanto, devido à extensão característica das malhas rodoviárias e consequente complexidade, ao utilizar dados de sensoriamento remoto, é fundamental a adoção de métodos automatizados que agilizem os processos de obtenção de informações das rodovias a partir de imagens, comumente tratados como métodos de extração de rodovias.

A extração de rodovias como tema científico recebe atenção de pesquisadores há várias décadas, dos trabalhos pioneiros de Bajcsy e Tavakoli (1976) e Quam (1978) até os dias de hoje surgiram uma variedade de métodos. Nas últimas décadas, um dos aspectos que vem fomentando o desenvolvimento de complexos métodos de extração de rodovias é a adoção de bancos de dados cartográficos pelas agências públicas e iniciativa privada, implicando em uma demanda contínua por dados atualizados de grandes extensões territoriais (municípios, estados,

etc). Logo, os processos de extração estão progressivamente deixando de focar na obtenção de segmentos que descrevam o eixo de rodovias isoladas, para contemplar estruturas completas de redes de rodovias, também chamadas de malha rodoviária, composta por conjuntos de segmentos e cruzamentos topologicamente corretos (MABOUDI et al., 2016; ZANG et al., 2017). Ainda, devido à crescente quantidade de dados cartográficos disponíveis nestas bases, há um grande interesse em fazer uso destes conhecimentos a priori, tendo em vista que os processos de extração atuais não são suficientemente robustos para a aquisição automática de bases de dados rodoviários a partir do zero (ZHANG, 2003; GERKE e BUSCH, 2005; ZIEMS et al., 2017).

Uma consulta feita recentemente às bases de dados científicas *Scopus*<sup>1</sup> e *Web of Science*<sup>2</sup> por palavras chave relacionadas ao tema “extração de rodovias” (*road extraction, street extraction, highway extraction, road network extraction, street network extraction e highway network extraction*), restringindo os resultados aos últimos 11 anos, retornou 489 artigos na *Scopus* e 417 na *Web of Science*, distribuídos conforme gráfico da Figura 1.

Figura 1. Distribuição temporal da produção científica no tema "road extraction".



Fonte: Base de dados *Web of Science* e *Scopus* (2017).

É possível notar uma queda nas produções científicas a partir de 2014 com retomada em 2016, comportamento cíclico semelhante ao período 2006 a 2008 e que já foi registrado em décadas anteriores. Esta oscilação nos volumes de publicações científicas é resultado natural da produção compassada dos grupos que exploram este tema e que, como pode ser observado na Tabela 1, são restritos a poucos pesquisadores.

<sup>1</sup> <https://www.scopus.com>

<sup>2</sup> <http://apps-wofknowledge.ez87.periodicos.capes.gov.br>

Tabela 1. Produção por pesquisador no tema “extração de rodovias”.

<i>Web of Science</i> (2006-2017)		<i>Scopus</i> (2006-2017)	
Pesquisador Líder	Produção (un.)	Pesquisador Líder	Produção (un.)
Dal Poz, A.P.	11	Uchimura, K.	12
Gamba, P.	11	Dal Poz, A.P.	11
Li, J.	10	Koutaki, G.	11
Shi, WZ.	9	Uemura, T.	11
Lisini, G.	8	Herumurti, D.	10
Amini, J.	7	Gamba, P.	9
Li, Y.	7	Amini, J.	8
Tupin, F.	7	Lin, X.	7
Uchimura, K.	7	Lisini, G.	7
Zerubia, J.	6	Zerubia, J.	7

Fonte: Base de dados *Web of Science* e *Scopus* (2017).

Estes pesquisadores estão distribuídos em vários países, conforme Tabela 2, que são em sua maioria nações de grande extensão territorial, dando indícios da forte e saudável relação do tema com as demandas regionais. Por outro lado, a presença de países altamente industrializados, reconhecidos pela produção científica de ponta, indica a relevância científica do tema. Neste contexto, são desenvolvidos métodos de extração de rodovias com diferentes graus de automação e complexidade, de acordo com as motivações advindas da iteração entre a reflexão científica e a demanda social.

Tabela 2. Distribuição por país da produção no tema “extração de rodovias”.

<i>Web of Science</i> (2006-2017)		<i>Scopus</i> (2006-2017)	
País	Produção (un.)	País	Produção (un.)
China	173	China	232
EUA	39	EUA	37
França	36	Índia	34
Canadá	32	França	31
Índia	26	Japão	27
Alemanha	23	Alemanha	24
Irã	21	Irã	22
Itália	19	Canadá	20
Japão	19	Brasil	18
Brasil	17	Itália	13

Fonte: Base de dados *Web of Science* e *Scopus* (2017).

Em termos gerais, a motivação do desenvolvimento de métodos automatizados de extração de rodovias é a obtenção de informações que descrevam essa feição, segundo um ou mais aspectos, para fins de mapeamento cartográfico em grandes extensões territoriais, reduzindo custos e desonerando o operador humano de tarefas repetitivas e enfadonhas. No

entanto, em grande parte por operarem de forma isolada, a maioria dos métodos atuais apresentam como resultado as informações de descrição das rodovias, que apesar da alta qualidade geométrica, demandam um enorme esforço do operador para colocá-las nos padrões comumente adotados por banco de dados estabelecidos segundo alguma Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE), contrariando sua motivação inicial de automação.

Essa situação é agravada quando o método é utilizado de forma sistemática em uma ampla rede de rodovias, como a de um estado ou nação, pois antes de realizar a padronização das extrações o operador humano terá que dedicar um considerável tempo e esforço para verificar a ocorrência de falsos positivos e principalmente falsos negativos nos resultados. Isto ocorre em virtude de os métodos clássicos de extração de rodovias serem elaborados com base no modelo ideal de rodovia, fazendo uso da resposta radiométrica característica da pavimentação asfáltica e do comportamento geométrico regular, aspectos nem sempre encontrados em grandes extensões territoriais. O Brasil, por exemplo, possui uma malha viária mapeada com mais de 1,7 milhão de quilômetros, sendo que 87% desta malha não apresenta o comportamento clássico do projeto de engenharia rodoviária (ANTT, 2009; CNT, 2016), ou seja, possui uma geometria típica de traçado em leito natural e não está pavimentada, características marcantes das rodovias em áreas rurais (BRASIL, 1997; DNIT, 2007).

Uma possível forma de minimizar estas questões é a utilização de dados geoespaciais vetoriais e matriciais preexistentes para auxiliar no processo de extração e garantir uma padronização adequada dos resultados. Esta proposta, no contexto de extração de rodovias a partir de imagens, apresenta uma crescente viabilidade, tendo em vista as políticas adotadas pelas agências governamentais de padronização, unificação e compartilhamento de suas bases de dados, tornando cada vez mais raros os espaços sem qualquer tipo de mapeamento prévio (mesmo que incompleto ou pouco acurado). Assim, o método de extração de rodovia passaria a fazer parte de um processo mais abrangente de atualização da malha rodoviária preexistente, fazendo uso de dados de diferentes naturezas.

Assim, nesta pesquisa, considera-se como mote a atualização da malha rodoviária a partir de métodos (semi-) automáticos de extração de rodovias, utilizando dados preexistentes de maneira a:

- Potencializar os processos, viabilizando o seu uso em grandes extensões territoriais caracterizadas como áreas rurais; e
- Refinar os resultados, aproximando-os dos padrões exigidos nas IDE.

Neste contexto, questões muitas vezes tratadas em etapas de pós-processamento, como a preservação da topologia, passam a ser consideradas durante a execução do processo.

Por fim, essa pesquisa vai de encontro com a agenda de pesquisa e visão científica da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS), proposta para os próximos 10 anos e que promove a extração e utilização de informações oriundas de imagens a partir dos princípios de Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Ciência da Informação Espacial (CHEN et al., 2016).

## 1.2 Hipótese e objetivos

Diante da maturidade alcançada pelos métodos de extração de rodovias, da disponibilidade massiva de dados geoespaciais e da crescente complexidade a que estes dados estão sujeitos para pertencerem às IDE, o presente trabalho apresenta a seguinte hipótese:

*“Será possível apresentar um método para atualização sistemática de malha rodoviária em área rural, que seja capaz de preservar informações e estruturas preexistentes, adaptando processos clássicos de extração de rodovias para a integração de dados geoespaciais?”*

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um método para a atualização (expansão de ramos e correção geométrica) de malha rodoviária advinda de bases de dados cartográficos elaboradas segundo uma IDE, por meio da integração de diferentes tipos de dados (mapa vetorial, imagem de satélite, modelo digital de superfície e trajetórias GPS), refinados via *snakes* de rede, preservando a integridade.

Os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Utilizar dados advindos de bases de dados elaboradas segundo a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE);
- Realizar processos de conflação da malha vetorial preexistente nas bases de dados geoespaciais, com dados obtidos de outras fontes, mantendo a integridade de acordo com a IDE que a definiu;
- Processar as imagens *Rapideye* para a extração de feições lineares;
- Implementar o modelo matemático das *snakes* de redes validando sua característica de preservação da topologia;
- Garantir a integridade topológica da malha resultante no processo de atualização;
- Avaliar experimentalmente o método proposto.

### 1.3 Potencial de contribuição da solução proposta

A presente pesquisa propõe um método de atualização de malha rodoviária em cenário rural que está organizado em três partes, das quais é possível destacar as seguintes contribuições:

- Etapa de Expansão da Malha: Uma contribuição relevante desta etapa é a demonstração da viabilidade de utilização das trajetórias GPS em processos auxiliares aos fotogramétricos. Porém, a maior contribuição é o método proposto para a inferência de mapas de rodovias a partir das trajetórias GPS, de relevante grau de ineditismo;
- Etapa de Ajuste da Malha: O destaque desta etapa reside no pré-processamento proposto para a extração de rodovias a partir de imagens *RapidEye*, que sugere um índice inédito denominado *subred edge* para destacar rodovias em áreas rurais nas imagens *RapidEye*, algo escasso na literatura científica e de relevância no contexto nacional.
- Etapa de Refino da Malha: Nesta etapa destaca-se o uso de *snakes* de redes, método ainda pouco explorado na literatura e que tem por característica a movimentação completa de uma malha preservando sua topologia, característica fundamental para o método aqui proposto.

Além destes destaques pontuais o método proposto apresenta ineditismo e relevância, agindo de diferentes formas sobre a geometria, sempre mantendo a integridade da malha. Assim, o método proposto extrapola uma extração de rodovias e se firma como um processo de atualização de malhas, que dentre outras ações também extraí rodovias em uma de suas etapas.

### 1.4 Estrutura da tese

Este texto está organizado em cinco seções, sendo esta primeira introdutória, contextualizando e explicitando as motivações e contribuições da pesquisa. Na seção 2, de Fundamentação Teórica, o leitor irá encontrar os conceitos fundamentais para compreensão da complexidade dos dados envolvidos (subseção 2.1), dos processos executados (subseções 2.2) e do potencial das *snakes* de rede neste contexto (subseção 2.3). Em seguida, na seção 3, de Materiais e Métodos, são apresentados os dados utilizados nesta pesquisa (subseção 3.1) e descrito o método proposto (subseção 3.2), inclusive com detalhamento de seus processos complementares (subseção 3.3). Já na seção 4, de Experimentos, são apresentados os experimentos realizados nos processos complementares (subseção 4.1) e no método proposto



(subseção 4.2), acompanhados por discussões a respeito de potenciais e limitações detectadas. Por fim, na seção 5 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Para a compreensão plena da complexidade e rigor do método proposto recomenda-se a leitura integral do texto. No entanto, se o leitor tiver interesse somente no aspecto de inferência de mapas de rodovias a partir de trajetórias GPS deverá se dedicar a leitura das subseções: 2.1.2, 2.2.2, 3.1.4, 3.3.1 e 4.1.1. Por outro lado, se o interesse do leitor for o processo de extração de rodovias a partir de imagens *RapidEye* recomenda-se as subseções: 2.1.1, 2.2.1, 3.1.2, 3.3.2 e 4.1.2. Por fim, se o leitor desejar ter uma visão superficial do método recomenda-se as subseções 2.1.3, 2.2.3, 2.3.2, 3.2 e 4.2.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No esforço de subsidiar a compreensão das particularidades dos dados envolvidos e a multiplicidade dos desafios enfrentados no decorrer da pesquisa, nesta seção serão caracterizados os dados geoespaciais envolvidos e as normatizações aplicáveis para inserção em repositórios cartográficos nacionais (Seção 2.1), bem como algumas abordagens presentes na literatura de processamento destes dados (Seção 2.2) e os conceitos relacionados diretamente com a manipulação geométrica da estrutura de malha via *snakes* de rede (Seção 2.3).

### 2.1 Dados Geoespaciais

Longley et al. (2013), apontam a ascensão na literatura do termo geoespacial como uma particularização do termo espacial. Segundo os autores o termo espacial refere-se a qualquer espaço, não sendo utilizado exclusivamente para o espaço da superfície terrestre, enquanto o termo geoespacial refere-se à porção explicitamente relacionada com a superfície terrestre ou próximo a ela, sendo também tratado em algumas áreas como geográfico.

Nesta seção serão caracterizados os aspectos técnicos das categorias de dados geoespaciais envolvidos nesta pesquisa, iniciando com a descrição dos produtos fotogramétricos (subseção 2.1.1), se estendendo até os dados provenientes de coleta voluntária, que não apresentam garantias de qualidade (subseção 2.1.2). Em seguida (subseção 2.1.3), será apresentada a estruturação básica destes dados em nível conceitual, de acordo com a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais.

#### 2.1.1 Produtos Fotogramétricos

A Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS) define Fotogrametria como sendo "a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente, por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens e padrões de energia eletromagnética radiante e outros fenômenos" (SLAMA, 1980). Esta definição abrange as duas áreas das quais os produtos fotogramétricos derivam: a Fotogrametria métrica e a Fotogrametria interpretativa. O princípio da Fotogrametria métrica consiste na realização de medições precisas em imagens com o objetivo de determinar distâncias, ângulos, áreas, volumes, elevações e formas dos objetos. Já na

Fotogrametria interpretativa o objetivo é o reconhecimento de objetos e a identificação de suas características, atribuindo-lhes significado por meio de análises cuidadosas e sistemáticas (WOLF et al., 2014).

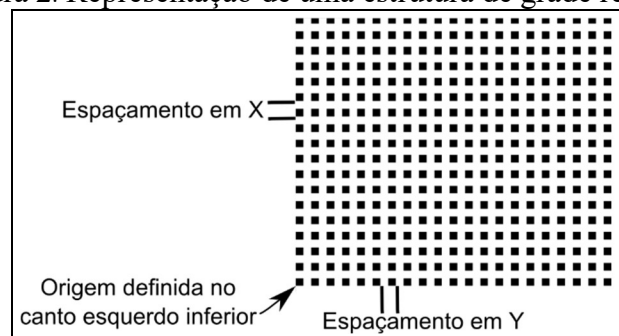
Os produtos fotogramétricos caracterizam-se por serem dados geoespaciais resultantes de processos bem definidos e regulamentados. Miller (2013), propõe categorizá-los em Produtos de Elevação, Produtos de Imagem e Produtos de Feição.

#### a) Produtos de Elevação

Por várias décadas os processos fotogramétricos são utilizados para gerar produtos de elevação, também chamados de produtos altimétricos. Nos últimos anos os avanços trazidos pelos sistemas computacionais digitais ocasionaram uma crescente automação na geração e manipulação de produtos altimétricos, tornando-os bastante populares entre usuários de SIG.

Um produto altimétrico é uma representação matemática e digital das elevações do terreno e também de qualquer nível acima dele, podendo ser chamado de Modelo Digital de Elevação (MDE). Para Egels e Kasser (2002), quando o MDE se limita a representar a elevação do terreno pode ser chamado de MDT (Modelo Digital do Terreno). Em contrapartida, quando representa a elevação máxima de cada ponto, proveniente do terreno ou acima dele, é chamado de MDS (Modelo Digital de Superfície). As formas nas quais o MDE pode ser produzido variam de acordo com as exigências da aplicação a que se destinam, podendo ser curvas de nível, grade regular, rede irregular de triângulos, entre outras. A grade regular, ou malha regular, ou ainda *grid*, é amplamente utilizada devido a simplicidade de sua estrutura matricial, na qual cada entrada contém um valor de elevação ( $Z$ ) do terreno, amostrada em intervalos regulares no espaço imagem ( $x, y$ ) ou ( $C, L$ ), designando coluna e linha (EL-SHEIMY, 1999). Na estrutura da grade regular (Figura 2) estão definidos intrinsecamente uma origem, o espaçamento e a dimensão da grade.

Figura 2. Representação de uma estrutura de grade regular.



Adaptado de Miller (2013).

O espaçamento dos pontos amostrados no terreno pode ser indicado em segundos de arco para coordenadas geodésicas ou em metros numa dada projeção cartográfica. Com estes parâmetros é possível recuperar as coordenadas  $(X, Y)$  de qualquer valor  $(Z)$  armazenado, o que evita a necessidade de armazenar um  $(X, Y)$  local para cada ponto na grade (MILLER, 2013).

A posição de um ponto na grade é dada em coordenadas  $(C, L)$ , pode ser determinada pela seguinte equação (MIKHAIL et al., 2001):

$$\begin{aligned} C &= (X_p - X_0)/\Delta_x, \\ L &= -(Y_p - Y_0)/\Delta_y, \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $(X_0, Y_0)$  são as coordenadas de terreno da origem da grade;  $(X_p, Y_p)$  são as coordenadas de terreno do ponto que se deseja encontrar na grade; e  $(\Delta_x, \Delta_y)$  são os valores de amostragem da grade em unidade do terreno. Em contrapartida, quando se deseja definir as coordenadas de terreno  $(X, Y)$  de um determinado ponto na grade  $(C, L)$ , têm-se:

$$\begin{aligned} X_p &= (C * \Delta_x) + X_0, \\ Y_p &= (L * \Delta_y) + Y_0. \end{aligned} \quad (2)$$

O produto de elevação confeccionado em estrutura de grade regular pode ser distribuído e armazenado em diferentes formatos, sendo o formato de imagem digital *GeoTIFF*, que é uma extensão do padrão TIFF (*Tagged Image File Format*) para dados geoespaciais, uma opção bastante difundida (VASCONCELLOS, 2002). Neste formato a grade regular é corriqueiramente chamada de *raster* e as elevações são indicadas pela tonalidade do *pixel*, com tons próximo ao branco para pontos elevados e preto para os mais baixos.

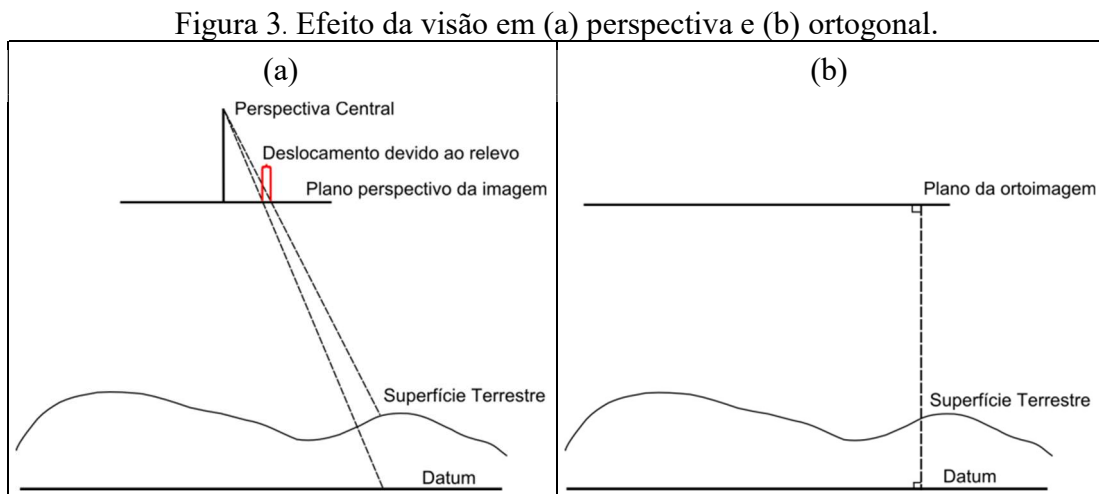
Devido as iniciativas governamentais de geração de produtos de elevação em nível global, este tipo de dado tem sido consumido por um número cada vez maior de usuários de SIG. Na subseção 3.1.1 são apresentadas as características e avaliada as especificações de um dado de elevação no formato *GeoTIFF* que é utilizado no método proposto.

## b) Produtos de Imagem

Os produtos desta categoria são basicamente imagens que descrevem objetos do mundo físico (espaço-objeto), por meio de uma representação bidimensional (espaço-imagem), gerada a partir de técnicas fotogramétricas e de sensoriamento remoto, juntamente com o processamento de imagem (MIKHAIL et al., 2001). O termo *imagem* refere-se a uma função de intensidade luminosa bidimensional denotada por  $f(x,y)$ , com  $(x,y)$  indicando coordenadas espaciais e  $f$  a intensidade (brilho) na coordenada indicada. A função  $f(x,y)$  é caracterizada pela quantidade de luz incidindo na cena (*iluminação*) e pela quantidade de luz refletida pelos

objetos na cena (*reflectância*) (GONZALEZ e WOODS, 2010). Dentre os diferentes tipos de produtos de imagem destacam-se as imagens ortorretificadas, ou ortoimagens, que se refere a uma imagem corrigida da visão perspectiva central para uma projeção ortogonal, com a correção devido a orientação do sensor e do deslocamento devido ao relevo (MIKHAIL et al., 2001). Ou seja, as ortoimagens convencionais são produtos de imagem isentas de erros provocados pela inclinação no momento da captura e deslocamento do relevo, viabilizando o uso em sistemas não fotogramétricos.

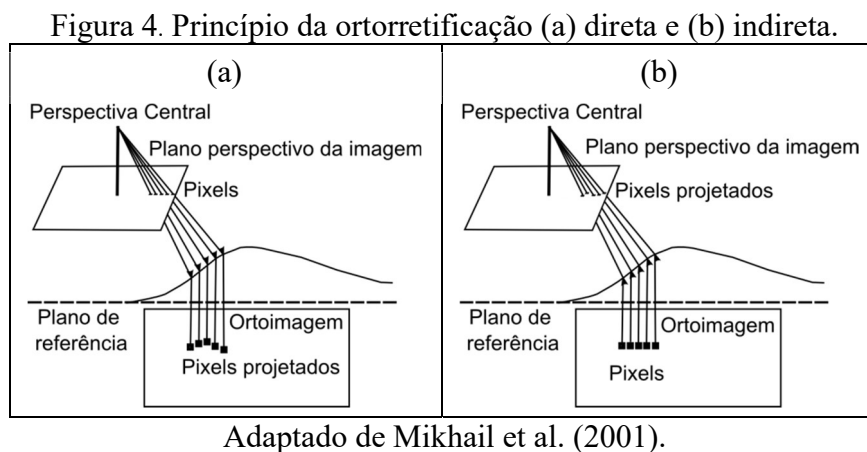
Na captura da imagem com visão perspectiva central o feixe de luz que passa pelo centro perspectivo é projetado no plano da imagem (Figura 3a) de maneira que pontos de mesma posição planimétrica no terreno, mas em diferentes altitudes, sejam projetados em diferentes posições na imagem, ou seja, haverá um deslocamento devido ao relevo que afetará de forma não uniforme a escala da imagem. A magnitude deste deslocamento está relacionada com o comportamento do relevo, a altitude da plataforma e a distância focal da câmera. Já em uma imagem em projeção ortogonal, o feixe é projetado de forma perpendicular a um plano horizontal de referência (Figura 3b), eliminando o deslocamento devido ao relevo e consequentemente tornando a escala da imagem uniforme (MIKHAIL et al., 2001).



Adaptado de Mikhail et al. (2001).

A partir da imagem em perspectiva central a ortorretificação, ou seja, o processo de geração de ortoimagem, pode ser realizado de forma direta ou indireta (MIKHAIL et al., 2001), fazendo uso de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Na forma direta (Figura 4a) os *pixels* da imagem de entrada (perspectiva central) são projetados no MDE por monorrestituição (MAKAROVNIK, 1973) utilizando as equações de colinearidade na forma inversa, para então serem ortogonalmente projetados do MDE para a imagem resultante (ortoimagem), atribuindo-

lhe o valor de brilho. O resultado será um conjunto de pontos irregularmente espaçados na ortomagem, sendo necessário aplicar uma interpolação na radiometria para produzir uma grade regular de *pixels*. Já na forma indireta (Figura 4b), cada pixel inicialmente vazio da imagem resultante (ortomagem) tem suas coordenadas planimétricas relacionadas ao MDE, para em seguida serem projetados na imagem original (perspectiva central) via equações de colinearidade na forma direta, identificando o valor de brilho a ser atribuído à cada pixel da ortomagem. Como os pixels da imagem original não serão coincidentes com os resultantes, impedindo uma atribuição direta, o valor de brilho será obtido via interpolação nos pixels da imagem original ou reamostragem.



Nas imagens orbitais os erros provocados pelo deslocamento devido ao relevo foram negligenciados por várias décadas, porém devido ao aumento na resolução espacial desses sensores e a crescente necessidade de integração entre diferentes tipos de dados, esses erros passaram a ser tratados (TOUTIN, 2004). Segundo Tao et al. (2000), a ortoretificação de imagens de satélite pode ser realizada pela equação de colinearidade (modelo rigoroso) adaptada para o método de aquisição de dados do tipo *pushbroom*, ou por modelos não-paramétricos/generalizados, que são independentes do método de aquisição e do tipo de sensor, tais como os baseados nos polinômios racionais 3D (Modelo Funcional Racional).

Seja na forma direta ou indireta, o processo de ortoretificação acaba por reprojeter a imagem para uma projeção ortográfica, tornando simples a relação com outros sistemas, que pode ser estabelecida pela seguinte equação (MILLER, 2013):

$$\begin{aligned} X &= a_1 + a_2L + a_3C, \\ Y &= b_1 + b_2L + b_3C, \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $X$  e  $Y$  são as coordenadas de terreno;  $C$  e  $L$  são as coordenadas de coluna e linha na ortoimagem;  $a_1$  e  $b_1$  são as coordenadas de terreno da primeira coluna e linha da imagem;  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  são os termos de rotação e escala. Se não há rotação a escala é dada pelo tamanho do pixel no terreno (*Ground Sample Distance - GSD*).

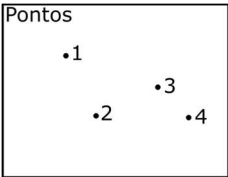
Por serem consideradas geometricamente equivalentes a mapas planimétricos as ortoimagens se tornaram um produto fotogramétrico bastante popular entre os usuários de SIG para a realização de medições diretamente na imagem ou o delineamento de feições de interesse para obter sua descrição vetorial em processos de vetorização. Estas possibilidades oferecidas pelas ortoimagens motivaram sua adoção em processos de cadastro governamental no Brasil, como descrito na subseção 3.1.2, tornando-as relevante para esta pesquisa.

### c) Produtos de Feições

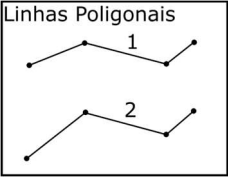
A obtenção de descrições acuradas das entidades cartográficas presentes em imagens constitui um importante processo fotogramétrico que produz uma representação da informação por meio dos elementos ponto (dimensão zero), linha (unidimensional) e área (bidimensional). Quando essas entidades são codificadas utilizando o modelo de dados vetorial são chamadas de feições (LONGLEY et al., 2013) e passam a ser representadas por pares de coordenadas, no caso de pontos (Figura 5a), e por estruturas complexas baseadas em pontos (listas, conjuntos, matrizes), nos casos das linhas e áreas (RIGAUX et al., 2002). Apesar de haver formas de definir curvas a partir de pontos utilizando funções matemáticas (*Spline*, *Bézier*, etc) normalmente na representação vetorial as linhas são pontos conectados por linhas retas que ganham a designação de polilinhas ou linhas poligonais (Figura 5b). Já a área é capturada como uma série de pontos ou vértices conectados por linhas retas com o último ponto coincidente com o primeiro (Figura 5c), formando bordas, fazendo com que sejam tratadas como polígonos (LONGLEY et al., 2013).

No ambiente SIG as feições vetoriais são constituídas por componentes de geometria (bi ou tridimensional) e atributos. Os pontos, componentes geométricos, com suas coordenadas (cartográficas ou geodésicas) descrevem a forma e localização, enquanto os atributos lhe indicam características particulares não espaciais. Os atributos são mantidos como registros tabulares que estão ligados à geometria através do Sistema de Gerenciamento de Base de Dados (SGBD), presente nos SIG (DOUCETTE et al., 2013).

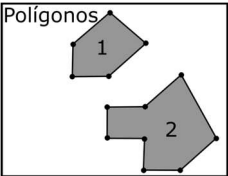
Figura 5. Representação de feições usando modelo de dados vetorial de (a) pontos, (b) linhas poligonais e (c) polígonos.

(a)		
Pontos	Número do ponto	Coordenadas (x,y)
	1	(2,4)
	2	(3,2)
	3	(5,3)
	4	(6,2)

(b)		
Linhas Poligonais	Número da linha poligonal	Coordenadas (x,y)
	1	(1,5)(3,6)(6,5)(7,6)
	2	(1,1)(3,3)(6,2)(7,3)

(c)		
Polígonos	Número do Polígono	Coordenadas (x,y)
	1	(2,4)(2,5)(3,6)(4,5)(3,4)(2,4)
	2	(3,2)(3,3)(4,3)(5,4)(6,2)(5,1)(4,1)(4,2)(3,2)

Fonte: Adaptado de Longley et al. (2013).

Uma feição raramente encontra-se isolada e em muitos casos o interesse reside no registro da coleção daquele tipo de entidade. Os modelos de representação vetorial de coleções de feições podem ser divididos em não topológicos (simples, espaguete, rede, etc) e topológicos. A topologia é a matemática e a ciência dos relacionamentos geométricos, que no caso das feições são propriedades não métricas (qualitativas) que se mantém constantes mesmo quando o espaço geográfico dos objetos geográficos é distorcido (LONGLEY et al., 2013). Assim, os modelos topológicos são constituídos por feições estruturadas utilizando-se regras topológicas, enquanto os modelos não topológicos possuem uma estrutura simplificada que não permite o armazenamento das relações topológicas explicitamente, exigindo o cálculo por demanda (RIGAUX et al., 2002).

No entanto, as estruturas simples (não topológicas), são fáceis de serem criadas, armazenadas e consultadas, fazendo dela o modelo mais utilizado nos SIG. Ainda, conforme comentado, a topologia pode ser recuperada por meio de cálculos adicionais, desde que os dados estejam geometricamente validados. A validação da qualidade geométrica para as linhas poligonais, feição de especial interesse nesta pesquisa por usualmente representarem rodovias, nada mais é do que verificar a integridade topológica por meio de (LONGLEY et al., 2013):



- Conectividade – verificar se todos os elementos se conectam para formar um grafo. Elementos de uma rede devem estar “conectados” em junções (intersecções);
- Intersecção de linha – verificar se existem junções em feições que se intersectam, mas não em feições que se cruzam (3D);
- Sobreposição – verificar se as feições adjacentes se sobrepõem evitando ambiguidades;
- Duplicidade – verificar a existência de linhas poligonais duplicadas e removê-las.

Dentre os modelos não topológicos de dados vetoriais, o espaguete é um dos mais populares, sendo utilizado na estruturação dos arquivos *shapefile*, que é um padrão industrial de fato para dados geoespaciais vetoriais e pode ser lido pela maioria dos SIG. Um arquivo *shapefile* contém a geometria (sem topologia) e os atributos organizados em um conjunto mínimo de três arquivos que o compõem. O arquivo principal de extensão *.shp* é acessado diretamente e armazena a geometria da feição em representações vetoriais no modelo espaguete; o arquivo de extensão *.dbf* abriga os atributos de cada registro de feição em estruturas tabulares; e o arquivo de extensão *.shx* faz a relação entre a geometria e os atributos (ESRI, 1998).

As principais agências governamentais do Brasil divulgam seus levantamentos (mapeamentos, informações censitárias, etc) no formato *shapefile* ou em formatos intermediários, que na prática devem ser convertidos para o *shapefile*. Na subseção 3.1.3 é apresentado e avaliado o *shapefile* utilizado nesta pesquisa.

### 2.1.2 *Crowdsourcing* de Dados Geoespacial

Os produtos fotogramétricos são dados geoespaciais com alto valor agregado devido aos esforços técnicos empregados na sua produção. Como resultado estes dados são acurados e padronizados, porém restritivos em decorrência dos custos envolvidos para grandes extensões territoriais. Uma alternativa incipiente são os dados obtidos por *crowdsourcing*.

Até o século 20 a produção e distribuição de dados geoespaciais estava concentrada exclusivamente nas mãos de profissionais altamente qualificados vinculados às forças armadas e agências governamentais, atuando dentro de rígidas especificações. Todavia, mais recentemente, graças a uma série de ferramentas computacionais o cidadão comum (com pouco ou nenhum conhecimento da área) foi incluso nos processos de mapeamento e coleta de dados,

atuando de maneira independente dos agentes clássicos (HEIPKE, 2010). Este cenário começou a ser delineado a partir dos anos 2000 com a oferta de uma nova geração de serviços via rede mundial de computadores (*World Wide Web*) que permitiram a interação entre os usuários e o conteúdo da própria rede, dando origem a um novo paradigma que a partir de 2004 foi designado pelo termo genérico *Web 2.0* (O'REILLY, 2007). Com as tecnologias da *Web 2.0* estavam estabelecidas as condições para que um novo modelo de negócio surgisse, o *crowdsourcing*, permitindo que grupos de usuários contribuíssem em várias áreas com conteúdo até então fornecido exclusivamente por profissionais.

O termo *crowdsourcing* foi apresentado originalmente por Howe (2006) como uma alternativa ao *outsourcing* que está relacionado aos processos de terceirização dentro das empresas, sendo uma contração das palavras *crowd* (multidão) e *outsourcing* (terceirização). O conceito de *crowdsourcing* está em formação na última década, sendo amplamente discutido na literatura científica (GARRIGOS-SIMON et al., 2012; SEE et al., 2016). Como resultado de um intenso levantamento bibliográfico Estellés-Arolas e González-Ladrón-de-Guevara (2012) definem o *crowdsourcing* como um tipo de atividade participativa *on line* na qual um indivíduo, uma instituição, uma organização sem fins lucrativos ou uma empresa propõe a um grupo de indivíduos de conhecimento, composição e quantidade variados, por meio de uma chamada aberta e flexível, o compromisso voluntário de uma tarefa. De acordo com os autores, conforme o objetivo, a tarefa poderá ter diferentes níveis de modularidade e complexidade, cabendo à multidão oferecer seu tempo, trabalho, dinheiro, conhecimento e/ou experiência, para realizá-la, recebendo como retribuição a satisfação de um determinado tipo de necessidade (econômica, social ou pessoal). Já o proponente, ou *crowdsourcer*, irá obter e utilizar a seu favor o que o usuário trouxe para o empreendimento. Um dos maiores exemplos de sucesso desse modelo de negócio é o projeto de enciclopédia virtual colaborativa chamada *Wikipédia* (LEE e SEO, 2016), que conta atualmente com mais de 30 milhões de colaboradores registrados.

Paralelo ao desenvolvimento dos padrões que alicerçam na *Web 2.0* o *crowdsourcing*, ocorreu um intenso progresso nos sistemas de posicionamento e comunicação, que conciliados a miniaturização dos equipamentos eletrônicos resultaram na difusão de dispositivos móveis capazes de identificar sua própria localização e compartilhá-la (computador pessoal, smartphone, assistente pessoal digital, navegador e sistema de rastreamento, etc). A popularização destes equipamentos fomentou novas ações de *crowdsourcing* no cenário geoespacial, que até então se restringiam a projetos de mapeamento *on line*, como digitalização de feições a partir de base de mapas digitais. Vale destacar que essa perspectiva de participação

do cidadão na produção de informações geográficas por *crowdsourcing* fez surgir uma ampla gama de novos termos na literatura, tais como *geocrowdsourcing* (BENNER e KARIMI, 2013; HAKLAY, et al. 2008) que procura enfatizar o aspecto geográfico do *crowdsourcing* de informações geoespaciais; assim como neogeografia (TURNER, 2006) e neofotogrametria (LEBERL, 2010) que denotam a geração de produtos cartográficos sob essa nova concepção. Maiores detalhes sobre estes e outros termos emergentes são encontrados em See et al. (2016).

Distinções relativas a natureza dos dados de *crowdsourcing* de informações geoespaciais também são encontradas na literatura. Considerando o grau de controle do cidadão sobre a coleta, uso e reuso dos dados Harvey (2013) propõe o conceito de Informação Geográfica Contribuída (CGI, *Contributed Geographic Information*) como um contraponto ao conceito de Informação Geográfica Voluntária (VGI, *Volunteered Geographic Information*). O termo Informação Geográfica Voluntária (VGI) foi utilizado pela primeira vez em 2007 para designar o uso de ferramentas *on line* para criar, reunir e disseminar dados geográficos fornecidos voluntariamente por indivíduos (GOODCHILD, 2007). No VGI a informação geográfica coletada é fornecida com o conhecimento e consentimento explícito do produtor dos dados que optou por “entrar” (*opted-in*) no processo tendo controle sobre a parte que lhe cabe, ou seja, um legítimo voluntário (HARVEY, 2013). Um exemplo de iniciativa baseada em VGI é o projeto de mapeamento colaborativo *OpenStreetMap* (ARSANJANI, 2015), que iniciou em 2006 e possui mais de 3,5 milhões de cidadãos registrados. Já no aspecto da Informação Geográfica Contribuída (CGI, *Contributed Geographic Information*) a informação geográfica é coletada e transmitida de forma autônoma, normalmente mediante uma permissão compulsória, sem o conhecimento explícito do indivíduo ou com o conhecimento, porém com pouco ou nenhum controle deste sobre o processo. Assim, apesar de fornecer os dados o indivíduo está “fora” (*opted-out*) do processo por não o controlar, ou seja, ele contribui, mas não é um voluntário (HARVEY, 2013; SEE et al., 2016). São exemplos de CGI as informações de localização recolhidas continuamente por *smartphones* para fins de Serviços Baseados em Localização (LBS, *Location-Based Service*), e as coletadas por equipamentos de navegação e monitorização de veículos em Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, *Intelligent Transport System*).

Tanto no CGI, quanto no VGI, o registro da localização ao longo do tempo é a essência da informação geoespacial de interesse, e dentre as possíveis formas de determinar a localização a partir de um equipamento portátil destacam-se as soluções via GNSS, em especial o GPS, que é capaz de realizar o registro massivo de trajetórias que descrevem a mobilidade de pessoas, veículos, etc. Vale ressaltar que atualmente a grande maioria dos equipamentos portáteis

contam com sistema de navegação inercial e operam com mais de um sistema GNSS, porém os dados gerados são comumente tratados na literatura como trajetória GPS. Assim, uma trajetória GPS é o rastro espaço-temporal gerado por um objeto em movimento no espaço objeto, amostrado em pontos contendo informações de posição, tempo e atributos. Uma Base de Dados de Trajetórias (BDT) abriga um conjunto de trajetórias ( $TR_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ), com  $BDT = TR_1, TR_2, \dots, TR_n$ . Cada trajetória ( $TR_i$ ) é composta por uma sequência cronológica de pontos ( $P_j$ ,  $1 \leq j \leq m$ ), que é denotada por  $TR_i = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ . Cada ponto  $P_j$  em  $TR_i$  é composto pelo registro da localização geográfica do objeto em movimento ( $L_j$ , com  $L_j = X_j, Y_j, Z_j$ ), o instante de tempo do registro ( $T_j$ ) e os atributos complementares ( $A_j$ ), logo  $P_j = \{L_j, T_j, A_j\}$  (LEE et. al., 2008).

Quanto à qualidade dessas trajetórias obtidas por *crowdsourcing*, há consideráveis diferenças entre as originadas por VGI e CGI. No VGI pode ser solicitado ao voluntário que os dados estejam dentro de um padrão de amostragem, ou acompanhado de metadados básicos, ou restrito a uma área ou modelo de equipamento GPS. Após a coleta podem ser adotadas ainda medidas para garantir a qualidade dos dados a serem inseridos no BDT, tais como verificação automatizada, revisão por pares e uso de múltiplas observações. No projeto *OpenStreetMap*, por exemplo, devido a regulamentação de certos processos para os voluntários, é possível garantir uma precisão planimétrica média de 6 m (HAKLAY, 2010; HEIPKE, 2010) para a maior parte da BDT. No CGI, por outro lado, não há qualquer garantia de qualidade, pois o dado é coletado sem interferência do contribuinte. Assim, a qualidade alcançada está relacionada quase que exclusivamente à acurácia proporcionada pelo equipamento GPS utilizado e as interferências ligadas ao registro e transmissão das posições coletadas. Um *smartphone* no cenário urbano, por exemplo, terá uma acurácia horizontal variando de 3 a 40 metros, devido aos problemas conhecidos de multicaminhos (MODSCHING et al., 2006). Apesar dessas características que poderiam sugerir uma predominância dos dados obtidos por VGI, o que ocorre atualmente é um vertiginoso crescimento das BDT's baseadas em CGI, devido fundamentalmente à expansão dos Serviços Baseados em Localização e dos Sistemas de Transporte Inteligente.

Dentre os diferentes formatos utilizados para o registro e compartilhamento de trajetórias GPS em projetos *crowdsourcing* destaca-se o formato GPX (*GPS eXchange Format*), que é baseado no padrão XML (*Extensible Markup Language*), de fácil conversão e amplamente compatível com aplicativos desktop e serviços web de mapeamento (<http://www.topografix.com/gpx/1/1/gpx.xsd>). O cabeçalho do arquivo GPX armazena informações gerais como a versão do padrão GPX utilizado, a identificação do aplicativo ou

dispositivo que criou o arquivo, etc (Figura 6). Os registros são feitos seguindo o padrão GPS com coordenadas no sistema WGS-84, latitude e longitude em graus decimais, elevação em metros e data/hora no tempo universal coordenado (UTC).

Figura 6. Recorte de um arquivo GPX.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>
<gpx xmlns="http://www.topografix.com/GPX/1/1"
  creator="MapSource 6.11.6" version="1.1"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.topografix.com/GPX/1/1
  http://www.topografix.com/GPX/1/1/gpx.xsd">
  <wpt lat="42.998545" lon="6.400465">
    <ele>193.109131</ele>
    <name>VIGIE DE P</name>
    <cmt>04-JUN-09 13:48:46</cmt>
    <desc>04-JUN-09 13:48:46</desc>
    <sym>Flag, Blue</sym>
  </wpt>
  <trk>
    <trkseg>
      <trkpt lat="-40.943039" lon="172.891352">
        <ele>731.219971</ele>
      </trkpt>
      <trkpt lat="-40.942966" lon="172.891563">
        <ele>727.855225</ele>
      </trkpt>
    </trkseg>
  </trk>
  ...
```

As estruturas internas para registro de posicionamentos no arquivo GPX são denominados pontos de passagem (*waypoints* ou *wpt*), rotas (*routes* ou *rte*) e trilhas (*trakes* ou *trk*). Ponto de passagem é um elemento individual que indica uma localização de grande interesse. As rotas são listas ordenadas de pontos previamente definidos que levam de uma determinada origem para um destino específico. Por fim, as trilhas são uma lista ordenada de pontos que descrevem um caminho percorrido, ou seja, são os registros das trajetórias. Estas trajetórias obtidas por *crowdsourcing* (VGI ou CGI) são dados geoespaciais de extrema relevância no atual panorama das Ciências Cartográficas, podendo ser utilizadas para vários fins, inclusive como fonte de informações e descrição geométrica das vias nas quais os receptores GPS trafegavam enquanto realizavam o seu registro, conforme apresentado na subseção 2.2.2. Já na subseção 3.1.4 é realizada uma avaliação das trajetórias GPS coletadas em cenário rural. Por fim, na subseção 3.3.1 é apresentada uma proposta própria de inferência geométrica a partir de trajetórias GPS.

### 2.1.3 Normatizações dos Dados Geoespaciais

Em virtude da crescente disponibilidade de dados geoespaciais a ser gerida nas bases de dados públicas e privadas, faz-se necessário a adoção de processos normatizados. A normatização dos processos de coleta, armazenamento e distribuição dos dados geoespaciais se

dá por meio de especificações técnicas elaboradas segundo padrões internacionais, que acabam por formar uma Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE). O Comitê Federal de Dados Geográficos dos Estados Unidos (FGDC), descreve a IDE como as tecnologias, políticas, padrões e recursos humanos necessários para adquirir, processar, armazenar, distribuir e promover a utilização de dados geoespaciais em todos os níveis de governo, setores privados e academia (FGDC, 2003).

No cenário mundial há organizações que trabalham em prol desses padrões, dentre as quais pode-se destacar (HADZILAKOS et al., 2000): o Comitê Europeu para Padronização (*European Committee for Standardization for Geographic Information - CEN/TC287*), a Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization for Geographic Information/Geomatics - ISO/TC 211*) e o Consórcio Geoespacial Aberto (*Open Geospatial Consortium - OGC*). No Brasil, a normatização das atividades cartográficas nacional se deu em 1967, por meio do Decreto-Lei nº 243 que estabeleceu as diretrizes e bases das atividades cartográficas e correlatas (BRASIL, 1967). Este decreto instituiu o Sistema Cartográfico Nacional (SCN), definiu as formas de representação do Espaço Geográfico Brasileiro (EGB) e estruturou o Plano Cartográfico Nacional, entre outros. Mais de duas décadas depois, em 1984, o Decreto Presidencial nº 89.817 estabeleceu as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, destinada a estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de normas da Cartografia Nacional, bem como padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas (BRASIL, 1984). Este Decreto encontra-se ainda em vigor, tendo sofrido alterações em sua redação, em particular no capítulo sobre o Sistema Geodésico Brasileiro, por meio do Decreto 5.334 de 2005 (BRASIL, 2005), viabilizando a adoção do *Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS)*, em sua realização do ano de 2000 (SIRGAS2000), como novo sistema de referência geodésico para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN).

Somente em 2008 a Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), foi instituída pelo Decreto Presidencial nº 6.666, que a define como o conjunto integrado de tecnologias; políticas; mecanismos e procedimentos de coordenação e monitoramento; padrões e acordos, necessário para facilitar e ordenar a geração, o armazenamento, o acesso, o compartilhamento, a disseminação e o uso dos dados geoespaciais de origem federal, estadual, distrital e municipal (BRASIL, 2008). Os principais componentes da INDE estão apresentados na Figura 7.

Figura 7. Componentes da INDE.



Fonte: DSG (2014).

A regulamentação dos padrões da INDE é feita por meio de Normas Técnicas elaboradas pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro, em consonância com as atribuições delegadas pelo Decreto-Lei 243/67, em parceria com outros órgãos, conforme descrito no quadro apresentado na Figura 8.

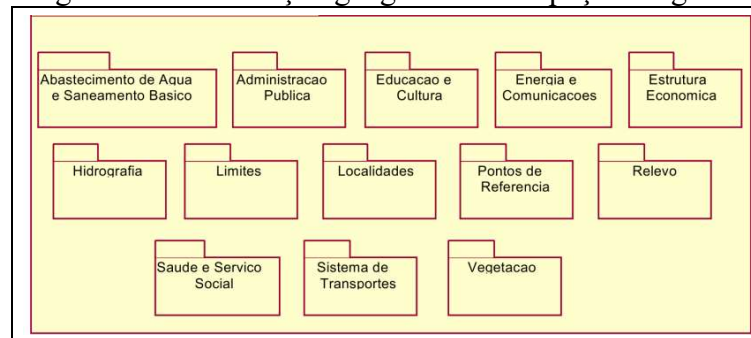
Figura 8. Distribuição das responsabilidades em favor da INDE.

Dado Geoespacial		Esp. define Padrão	Finalidade	Instituição Responsável	Situação / Instituição Executora
Cartografia Terrestre (Mapeamento Geográfico)	Dados vetoriais escalas menores que 1:250.000	Map série Brasil (2ª versão Man. CIM, doc. Téc. BCIM, e MD, v.5.0)	Definir um modelo de dados vetoriais para garantir a consistência lógica	IBGE - Art 8º do Decreto Lei Nr 243, 28 Fev67	Em Atualização IBGE
	Dados matriciais escalas menores que 1:250.000	NI	NI	IBGE	NI
Cartografia Terrestre (Mapeamento Topográfico)	Dados matriciais escalas 1:250.000 e maiores	ET-PCDG	Definir os padrões dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais matriciais	Exército Brasileiro- DSG -decreto Lei 243 Cap IV, art 6º. §1º, Letra b) com o Cap VII, art. 15, § 1º, numero 2	Em elaboração / DSG
	Dados vetoriais escalas 1:250.000 e maiores	ET-EDGV	Definir um modelo conceitual p/ dados vetoriais garantindo a consistência lógica		Elaborada/ CONCAR/ CEMND
		ET-ADGV	Definir regras de aquisição da geometria dos dados garantindo a consistência lógica do atributo geometria e consistência topológica		Elaborada/ DSG
		ET-PCDG	Definir os padrões dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais vetoriais		
		ET-RDG	Garantir a consistência na representação das mesmas classes de objetos		
	ET-CQPCDG	Definir os procedimentos para o controle de qualidade dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais vetoriais	Em elaboração / DSG		
Cartografia Terrestre (Mapeamento Cadastral)	Dados matriciais escalas 1:2.000 e maiores	ET-PCDG	Definir os padrões dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais do tipo planta cadastral matricial		
	Dados vetoriais escalas 1:2.000 e maiores	ET-PCDG	Definir os padrões das plantas cadastrais vetoriais		

Fonte: DSG (2014).

Para o Mapeamento Topográfico estão previstas cinco Especificações Técnicas (ET), todas já publicadas no Portal do Exército Brasileiro na seção de Normas do Sistema Cartográfico Nacional<sup>3</sup>. A primeira a ser publicada foi a Especificação Técnica para a Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV), que foca a estrutura de dados vetoriais e destina-se aos produtores, desenvolvedores de SIG e usuários finais de dados geoespaciais (CONCAR, 2008). Nela é apresentada uma abstração de objetos e fenômenos geográficos que formam o espaço geográfico brasileiro, percebidos a partir da escala de 1:25.000 e menores, modelada conceitualmente por técnica de orientação a objetos para fins de estruturação em banco de dados. Nesta modelagem foram obtidas treze categorias de informação (Figura 9), sendo a categoria Sistemas de Transporte a relevante para o propósito desta pesquisa.

Figura 9. Categorias de informação geográfica do Espaço Geográfico Brasileiro.



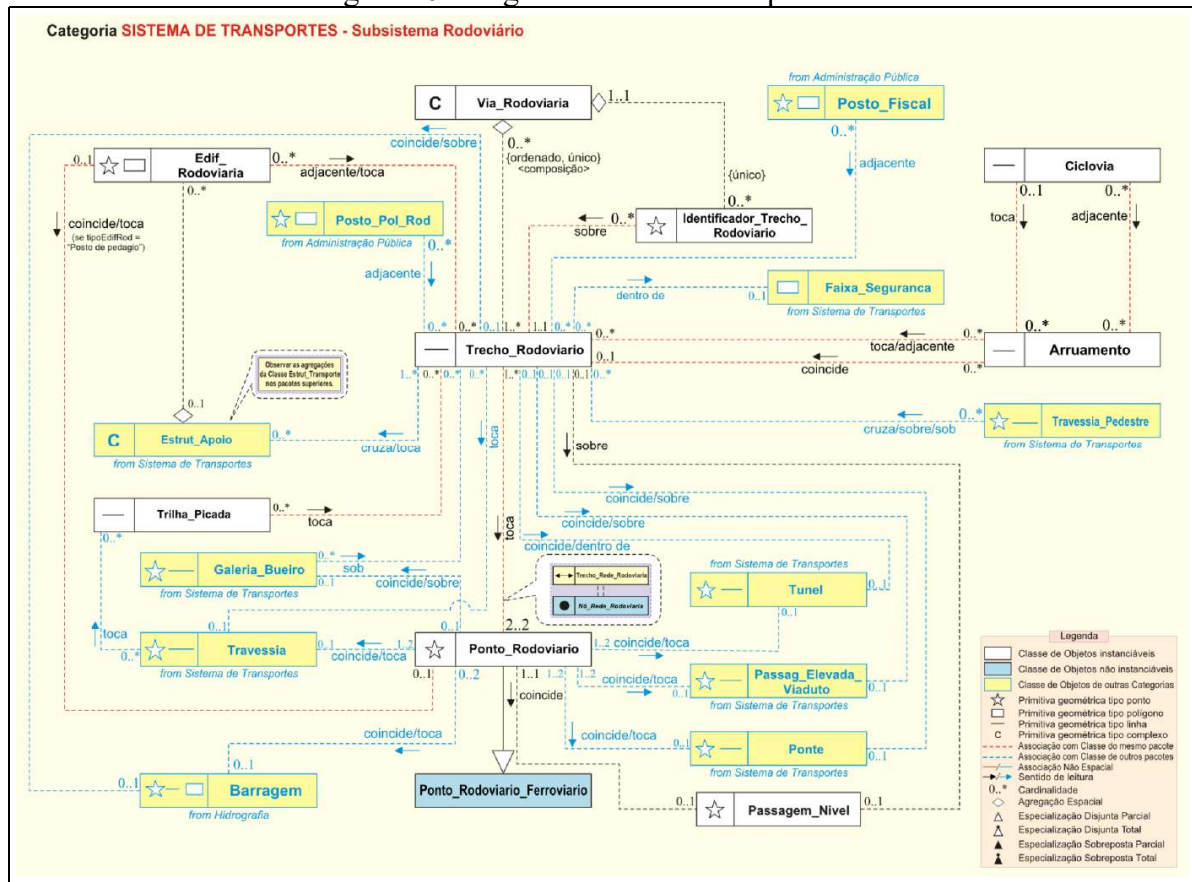
Fonte: CONCAR (2008).

A categoria Sistema de Transporte engloba o conjunto de sistemas destinados ao transporte e deslocamento de carga e passageiros, bem como as estruturas de suporte ligadas a estas atividades, estando organizado em quatro subsistemas: Ferroviário, Aeroportuário, Hidroviário e Rodoviário (CONCAR, 2008). O subsistema Rodoviário possui 21 classes de objetos (Figura 10), sendo a classe *Trecho\_Rodoviario* a de maior relevância neste subsistema, destinada a descrever as vias (rodovias, estradas rurais, ruas, etc) por meio do registro do seu eixo através da primitiva geométrica linha, além de um conjunto de atributos (Figura 11).

<sup>3</sup> <http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2>



Figura 10. Diagrama de Classe simplificado.



Fonte: CONCAR (2010).

Figura 11. Relação de atributos da Classe Trecho Rodoviário.

## 4) Sistema de Transporte:

Código	Classe	Descrição				Primitiva geométrica	
4.03 Trecho_Rodoviario		São as ligações rodoviárias entre dois pontos rodoviários.					
	Atributo	Tipo	Tamanho	Descrição	Domínio	Descrição	Requisito
4.03.1	geometriaAproximada	Booleano	-	Indica que a geometria adquirida é aproximada em relação à escala prevista para o produto cartográfico.	Sim Não	-	NÃO NULO
4.03.2	codTrechoRodov	Alfanumérico	25	Código para identificação de um trecho rodoviário.	A ser preenchido	Código Previsto no (PNV, SRE ou trechos rodoviários municipais).	NULO
4.03.3	tipoTrechoRod	Alfanumérico	18	Identifica o tipo do trecho rodoviário.	Acesso	Segmento rodoviário que liga a rodovia principal a determinado ponto de interesse, tais como: áreas urbanas, portos, parques etc.	NÃO NULO
					Rodovia	Via destinada ao tráfego de veículos sobre rodas.	
					Caminho carroçável	Via transitável em tempo bom e seco, com piso e traçado irregulares, geralmente dificultando o tráfego de veículos comuns a motor.	
					Auto-estrada	Via de tráfego rápido, com todos os acessos controlados, sem cruzamento de nível e destinada exclusivamente a veículos motorizados, com revestimento sólido (asfalto, concreto ou calçamento), com um mínimo de 4 faixas, apresentando separação física entre as pistas de tráfego, representável em escala ou não.	
4.03.4	jurisdicao	Alfanumérico	22	Indica a jurisdição do trecho rodoviário.	Desconhecida	-	NÃO NULO
					Federal	-	
					Estadual	-	
					Municipal	-	
4.03.5	administracao	Alfanumérico	16	Indica a esfera administrativa responsável pelo trecho rodoviário.	Propriedade particular	Localizada em propriedade particular, cuja responsabilidade é do proprietário do imóvel.	NÃO NULO
					Desconhecida	-	
					Federal	-	
					Estadual	-	
					Municipal	-	
4.03.6	concessionaria	Alfanumérico	100	Identifica o agente concessionário que explora o trecho rodoviário.	A ser preenchido	Ex.: Nova Dutra.	NULO
4.03.7	revestimento	Alfanumérico	15	Identifica a natureza do revestimento do trecho rodoviário.	Desconhecido	-	NÃO NULO
					Leito natural	A superfície de rolamento se apresenta no próprio terreno natural.	
					Revestimento o primário (solto)	O revestimento é de saibro e/ou cascalho.	
					Pavimentado	Todo o revestimento rígido ou flexível, tais como: betuminoso (asfalto ou concreto asfáltico, concreto, cimento, etc).	
4.03.8	operacional	Alfanumérico	12	Indica se o trecho rodoviário está operacional.	Calçado	O revestimento é de paralelepípedos, blocos de pedra ou por bloquetes.	NÃO NULO
4.03.9	situacaoFisica	Alfanumérico	13	Identifica a situação do trecho rodoviário.	Desconhecida	-	
					Abandonada	Onde não há investimentos para sua recuperação ou manutenção.	
					Destruída	Recuperação economicamente inviável, não sendo possível de ser recuperada por ter sua estrutura fundamental comprometida.	
4.03.10	nrPistas	Inteiro	-	Número de pistas do trecho rodoviário Pista – é a plataforma única de tráfego de veículo. Na presença de canteiro divisorio, guard-rails etc, ou qualquer impedimento físico à ligação das pistas (não sendo incluído aqui as divisões por olhos de gatos, sinalização horizontal), há a divisão de uma plataforma em duas pistas.	Construída	-	NULO
					Em Construção	-	
					Planejada	-	
4.03.11	nrFaixas	Inteiro	-	Número total de "faixas de rolagem" do trecho rodoviário.	A ser preenchido	Ex.: 4.	NÃO NULO
4.03.12	trafego	Alfanumérico	12	Indica o regime de tráfego do trecho rodoviário.	Desconhecido	Índice de trafegabilidade desconhecido.	NÃO NULO
					Permanente	O índice de trafegabilidade é permanente, não havendo interrupção sazonal do tráfego.	
4.03.13	canteiroDivisorio	Booleano	-	Indica se o trecho rodoviário possui canteiro divisorio.	Periódico	O índice de trafegabilidade é periódico, havendo interrupção sazonal do tráfego.	NÃO NULO
					Sim	-	
4.03.14	capacCarga	Real	-	Indica o limite máximo admissível de peso bruto total (PBT) no trecho rodoviário, em toneladas.	Não	-	NULO
					A ser preenchido	Valor em toneladas do limite máximo de peso bruto total no trecho.	NULO

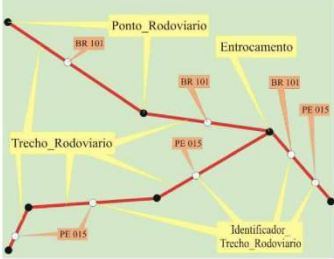
Fonte: CONCAR, 2010

Com as classes de objetos conceitualmente estruturadas pela ET-EDGV, coube a DSG viabilizar sua concretização elaborando a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), que regula e padroniza a aquisição da geometria dos dados geoespaciais vetoriais e atributos correlacionados, independentemente do tipo de insumo utilizado (DSG, 2011). Na ET-ADGV, conforme pode ser observado na coluna Método de

Confecção na Figura 12, é detalhada a forma de registro das informações geométricas e de atributos definidos pela ET-EDGV.

Figura 12. Regras de aquisição de geometria e atributos da classe Trecho Rodoviário.

SEÇÃO 4 - CATEGORIA SISTEMA DE TRANSPORTE - SUBSISTEMA RODOVIÁRIO

Classe		Código	Primitiva geométrica
Trecho_Rodoviario		4.03	—
Situação	Método de Confecção	Ilustração	
<p><b>Geral</b></p> <p><b>Finalidade:</b> Os objetos da classe <b>Trecho_Rodoviario</b>, destinam-se a apresentar o eixo da via.</p> <p><b>Regra Geral:</b> A regra geral de construção da geometria dos objetos da classe <b>Trecho_Rodoviario</b> é: 1) Primitiva geométrica do tipo linha. 2) Seu início e término sempre toca um objeto da classe <b>Ponto_Rodoviario</b>; 3) A linha sempre será traçada no eixo central da rodovia, mesmo no caso de trechos com múltiplas vias. Caso as pistas estejam separadas por canteiro passível de ser adquirido, em escala máxima, prevista para sua visualização serão adquiridos todos os eixos da via rodoviária. 4) Um mesmo objeto da classe <b>Trecho_Rodoviario</b> pode participar da construção de mais de um objeto da classe <b>Via_Rodoviaria</b>; 5) Um objeto da classe <b>Trecho_Rodoviario</b> que coincida com um arruamento, deve ser duplicado criando-se um objeto da classe <b>Arruamento</b></p> <p><b>Atributos:</b> <b>geometriaAproximada</b>= "Sim" ou "Não"; <b>tipoTrechoRod</b> = "Acesso" ou "Rodovia" ou "Caminho Carroçável" ou "Auto-estrada"; <b>jurisdicao</b> = "Desconhecida" ou "Federal" ou "Estadual" ou "Municipal" ou "Propriedade Particular" ou "Concessionada"; <b>administracao</b> = "Desconhecida" ou "Federal" ou "Estadual" ou "Municipal" ou "Particular" ou "Concessionada"; <b>revestimento</b> = "Desconhecido" ou "Leito Natural" ou "Revestimento Primário (Solto)" ou "Pavimentado" ou "Calçado"; <b>operacional</b> = "Desconhecido" ou "Sim" ou "Não"; <b>situacaoFisica</b> = "Desconhecida" ou "Abandonada" ou "Destruída" ou "Construída" ou "Em Construção" ou "Planejada"; <b>nrFaixas</b> = A ser preenchido; <b>trafego</b> = "Desconhecido" ou "Permanente" ou "Periódico"; <b>canteiroDivisorio</b> = "Sim" ou "Não".</p> <p><b>Relacionamentos:</b> - Um ou mais objetos desta classe deve(m) ser agregado(s) a um objeto da classe <b>Via_Rodoviaria</b>. - Um objeto desta classe pode estar sob objeto(s) da classe <b>Identificador_Trecho_Rodoviario</b> (no caso do trecho ser compartilhado por várias vias. Ex: trecho da BR-020 que compartilha com a DF-001, um trecho de via); - Um objeto desta classe pode ser tocado ou estar adjacente a objeto(s) da classe <b>Arruamento</b>; - Um objeto desta classe pode coincidir com objeto(s) da classe <b>Arruamento</b>; - Objeto(s) desta classe pode(m) ser cruzado(s), estar(em) sob, ou estar(em) sobre objeto(s) da classe <b>Travessia_Pedestre</b>; - Um objeto desta classe deve tocar, em seu início e término, objetos da classe <b>Ponto_Rodoviario</b>, ou uma das suas especializações; - Um objeto desta classe pode estar adjacente ou ser tocados a objeto(s) da classe <b>Edif_Rodoviaria</b>; - Um objeto desta classe pode ser tocados por objeto(s) da classe <b>Trilha_Picada</b>; - Um objeto desta classe pode estar dentro de um objeto da classe <b>Faixa_Seguranca</b>; - Um objeto desta classe pode cruzar e/ou tocar objeto(s) da classe <b>Estrut_Apoio</b>; - Um objeto desta classe pode estar adjacente a objeto(s) da(s) classe(s) <b>Posto_Pol_Rod</b> e/ou <b>Posto_Fiscal</b>; - Um objeto desta classe pode tocar um objeto da classe <b>Travessia</b>. - Um objeto desta classe pode estar dentro ou coincidir com objeto da classe <b>Tunel</b>; - Um objeto desta classe pode coincidir/ estar sobre objeto da classe <b>Passagem_Elev_Viaduto</b>; - Um objeto desta classe pode coincidir/ estar sobre objeto da classe <b>Ponte</b>. - Um objeto desta classe pode estar sobre ou coincidir com objeto da classe <b>Barragem</b>; - Um objeto desta classe pode estar sobre objeto da classe <b>Passagem_Nivel</b>; - Um objeto desta classe pode estar sobre objeto (s) da classe <b>Galeria_Bueiro</b>.</p>	 <p>O diagrama ilustra uma rede de trechos rodoviários. Linhas vermelhas representam os trechos, conectando pontos de conexão (Ponto_Rodoviario) marcados com BR 101 e PE 015. Um trecho específico é rotulado como Trecho_Rodoviario, e um ponto de conexão é rotulado como Entrocamento. Um objeto de identificação é rotulado como Identificador_Trecho_Rodoviario.</p>		
<b>Geral</b>			

Fonte: CONCAR (2011).

Por fim, para que um dado geoespacial (vetor ou *raster*) faça parte da INDE a sua qualidade deve estar de acordo com o disposto na Especificação Técnica dos Produtos dos Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG), que definiu os elementos de qualidade para cada tipo de produto (DSG, 2014). A exatidão posicional absoluta é um desses elementos, gerando classificações de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e o Erro Padrão (EP), conforme Quadro 1. O PEC é um indicador estatístico de dispersão relativo a 90% de nível de confiança, correspondendo  $1,6449 * EP$ . O termo EP é equivalente aos termos desvio-padrão e erro-médio-quadrático (BRASIL, 1984).

Quadro 1. PEC da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais.

PEC <sup>(1)</sup>	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A <sup>(2)</sup>	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51	28,00	17,02	70,00	42,55
A	B <sup>(1)</sup>	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00	50,00	30,00	125,00	75,00
B	C <sup>(1)</sup>	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00	80,00	50,00	200,00	125,00
C	D <sup>(1)</sup>	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00	100,00	60,00	250,00	150,00

Fonte: CONCAR (2011).

O PEC-PCD planimétrico das classes “B”, “C” e “D” do Quadro 1 correspondem, nessa ordem, as classes “A”, “B”, “C” do PEC Planimétrico previstas no Decreto nº 89.817/1984. Já o Quadro 2 estabelece o PEC-PCD altimétrico para os Modelos Digitais de Terreno (MDT), de Elevação (MDE) e de Superfície (MDS) e para os Pontos Cotados.

Quadro 2. PEC Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.

PEC-PCD <sup>(3)</sup>	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: CONCAR (2011).

Para que um produto digital possa ser aceito como produto de Referência do SCN, e consequentemente para a INDE, 90% ou  $1,6449 \cdot EP$  dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as suas coordenadas levantadas em campo por método de alta precisão, devem apresentar os valores iguais ou inferiores aos previstos ao PEC-PCD, devendo ainda apresentar os valores de EP também iguais, ou inferiores (CONCAR, 2011).

Processamentos podem ser aplicados sobre dados vetoriais ou matriciais para que possam ser gerados já no padrão INDE ou para que possam ser adequados a ele. Desta forma, um dado geoespacial dentro das especificações vigentes é resultado de um grande esforço técnico de padronização e, dentro do possível, deve ter suas características preservadas em processos de atualização e expansão, resultando em economia de tempo e recursos.

## 2.2 **Processamento de Dados Geoespaciais**

Nesta seção são apresentados os processos que despontam na literatura como formas de explorar os diferentes tipos de dados geoespaciais apresentados e que estão em consonância com o método proposto na Seção 3. Iniciando com operações de extração de feições em imagens (subseção 2.2.1), seguido pela filtragem das trajetórias GPS para inferência mapas (subseção 2.2.2), finalizando com o processo de conflação entre os dados geoespaciais (subseção 2.2.3).

### 2.2.1 **Extração de Feições**

A extração de feições do tipo linha em imagens digitais é uma tarefa corriqueira no Processamento de Imagens e Visão Computacional (HARALICK e SHAPIRO, 1992; GONZALEZ e WOODS, 2010). Para relacionar de forma precisa as linhas obtidas a partir de imagens digitais (espaço imagem) com a feição que a deu origem (espaço objeto), são necessários processos complementares que estão no escopo da Fotogrametria (SCHENK, 1996; MIKHAIL et al., 2001) e que podem tornar o dado apto a ser inserido em uma base de dados geoespacial.

Em bases de dados geoespaciais as linhas são comumente utilizadas para descrever as rodovias por meio da representação do seu eixo, como consta, por exemplo, na ET-ADGV apresentada na subseção 2.1.3. Estas linhas (também chamadas de linhas poligonais) podem ser obtidas a partir de processos manuais ou automatizados de extração de rodovias em imagens digitais. Na última década, a disponibilidade crescente de uma vasta gama de dados de imagem gerados por sensores orbitais multiespectrais de média e alta resolução promoveu a expansão dos processos de extração de rodovias, que passaram a explorar aspectos até então restritos ao Sensoriamento Remoto (KUMAR et al., 2014; MIAO et al., 2016; MABOUDI et al., 2016).

No entanto, diferentemente do que ocorre no Sensoriamento Remoto, a maioria dos processos fotogramétricos operam com uma única dimensão (banda). Essa aparente incompatibilidade entre as áreas pode ser transposta tanto pela adaptação dos algoritmos fotogramétricos para que utilizem dados em várias dimensões, quanto pela redução da dimensão espectral dos dados. Tal redução pode ser executada pela simples seleção de uma única banda com base nas respostas espectrais das feições de interesse ou por transformações aplicadas sobre as imagens ou bandas, que resultará em uma única imagem sintética. Essas

transformações podem ser realizadas por operações algébricas, como é caso de grande parte dos índices propostos na literatura.

Zha et al. (2003) desenvolveu um *Normalised Difference Built-up Index* (NDBI), utilizando as bandas do satélite *Landsat 7* (TM4: 0,76 – 0,90  $\mu\text{m}$ , TM5: 1,55 – 1,75  $\mu\text{m}$ ) para destacar áreas de construção e em seguida mapeá-las, com  $\text{NDBI} = (\text{TM5} - \text{TM4}) / (\text{TM5} + \text{TM4})$ . Mhangara et al. (2011) estabeleceu uma transformação sobre as bandas do satélite *Spot* (B: 450 – 525 nm, NIR: 760 – 890 nm), denominada *Built-up Area Index* (BAI), com  $\text{BAI} = (\text{B} - \text{NIR}) / (\text{B} + \text{NIR})$ , que produz uma imagem sintética que destaca as feições asfalto e concreto. Shahi et al. (2015) apresentou uma transformação para as bandas do sensor *WorldView-2* (NIR2: 0,86 – 1,04  $\mu\text{m}$ , B: 0,45 – 0,51  $\mu\text{m}$ ) cuja a imagem sintética realça a resposta da manta asfáltica das rodovias, gerando um *Index road extraction* (REI), com  $\text{REI} = (\text{NIR2} - \text{B}) / (\text{NIR2} + \text{B} \times \text{NIR2})$ . Outros índices podem ser encontrados na literatura, como indica o projeto *Index DataBase* (HENRICH et al., 2009), que é uma base de dados de índices na web (<http://www.indexdatabase.de>), mantido pelo *Institute of Crop Science and Resource Conservation*, da Universidade de Bonn, na Alemanha, com mais de 500 índices catalogados.

#### a) Álgebra de Imagem

Como é possível notar, os índices podem ser obtidos por operações aritméticas simples (adição, subtração, divisão e multiplicação), aplicadas aos Números Digitais de pixels homólogos, sem envolver a vizinhança dos mesmos (CAMPBELL e WYNNE, 2011). Assim, as operações algébricas podem ser utilizadas no processamento dos dados para a execução de processos fotogramétricos, como a extração de feições.

A transformação de dados multiespectrais pode ser executada entre diferentes imagens ou diferentes bandas de uma mesma imagem, produzindo uma nova imagem sintética. Quando as transformações ocorrem entre duas ou mais imagens da mesma cena, coletadas em diferentes datas, normalmente a imagem sintética trará informações relacionadas com as mudanças ocorridas na paisagem. Por outro lado, quando as transformações são aplicadas nas diferentes bandas de uma mesma imagem, a imagem sintética resultante destacará determinadas feições de acordo com a operação realizada e as bandas envolvidas (CAMPBELL e WYNNE, 2011).

As operações aritméticas, apesar de simples, possuem importantes características:

- Soma: esta operação promove a supressão de ruídos e conseqüentemente aumenta na relação sinal-ruído (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*), pois os ruídos aleatórios não

são susceptíveis de ocorrerem na mesma posição em diferentes bandas (LIU e MASON, 2016). Sua formulação é:

$$Y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n w_i X_i, \quad (4)$$

onde,  $K$  é um escalar;  $w_i$  é um peso que pode ser usado para compensar diferenças de brilho entre bandas;  $X_i$  ( $i= 1, 2, \dots, n$ ), devido a relação pixel-a-pixel, é tanto a banda  $i$  da imagem, quanto qualquer pixel da banda  $i$  e  $Y$  é a imagem sintética, bem como qualquer pixel dela.

- Subtração: é definida pela Equação 5 e reduz a quantidade de informações, removendo os aspectos em comum, mantendo assim os ruídos aleatórios. Em virtude dos pesos individuais  $w_i$  e  $w_j$  a operação permite a manipulação seletiva das respostas espectrais.

$$Y = \frac{1}{k} (w_i X_i - w_j X_j) \quad (5)$$

- Multiplicação: pode promover a modulação (atribuição das características) entre as imagens envolvidas, ou mascarar completamente regiões ao utilizar uma imagem binária na operação. Sua formulação é dada pela Equação 6.

$$Y = X_i \cdot X_j \quad (6)$$

- Divisão: é a operação definida pela Equação 7, sendo uma técnica efetiva no melhoramento seletivo das características espectrais.

$$Y = \frac{X_i}{X_j} \quad (7)$$

Assim, por meio de combinações entre esses operadores, além de outros, é possível gerar imagens sintéticas que abrigam respostas de diferentes bandas, potencializando o uso dos algoritmos fotogramétricos de extração de feições.

#### b) Filtro de Difusão

A natureza discreta dos dados envolvidos nas transformações algébricas pode produzir uma imagem sintética com ruídos. Essa situação tornar-se crítica em imagens com baixa ou média resolução, provocando descontinuidades em feições lineares, como por exemplo, rompendo a esperada homogeneidade dos pixels que descrevem uma rodovia. Assim, considerando a necessidade de remoção dos ruídos com preservação e recuperação das bordas das feições lineares em imagens de média e baixa resolução, é considerada como uma alternativa viável a difusão anisotrópica.

A filtragem por difusão é uma técnica de suavização motivada por processos físicos, podendo ser estabelecida para preservar estruturas, ou seja, ser capaz de remover ruídos sem desfocar ou deslocar as bordas da imagem (BROX, 2014; UTTENWEILER et al., 2003). No aspecto físico, a difusão é um processo de transporte que tende a nivelar as diferenças de concentração, ou seja, equilibra sem criar ou destruir massa. Esta propriedade de equilíbrio é representada pela primeira lei de *Fick* (MUKHERJEE e CHAKRAVORTI, 2014):

$$j = -D\nabla u. \quad (8)$$

Na equação um gradiente de concentração  $\nabla u$  causa um fluxo  $j$  que visa compensar esse gradiente. A relação entre  $\nabla u$  e  $j$  é dado pelo tensor de difusão  $D$ , uma matriz simétrica positiva definida, que descreve a magnitude e orientação preferencial do fluxo.

A observação de que a difusão apenas transporta a massa, sem alterá-la, é expressa pela equação de continuidade

$$\partial_t u = -\operatorname{div} j, \quad (9)$$

onde  $t$  indica o tempo e  $\operatorname{div}$  é operador divergente. Relacionando a Equação 8 com a Equação 9, tem-se a equação de difusão:

$$\partial_t u = \operatorname{div}(D\nabla u). \quad (10)$$

Considerando as intensidades da imagem como concentrações é possível utilizar a Equação 10 para suavizá-las. A condição inicial é definida pela imagem de entrada

$$u = (x, y, t = 0) = I(x, y). \quad (11)$$

Para  $t \rightarrow \infty$ , a difusão produz o estado de equilíbrio, isto é, uma imagem de valor constante, onde o valor é a média da imagem de entrada.

Se o tensor de difusão  $D$  for independente de  $u$ , ou seja, constante em todo o domínio da imagem, têm-se uma difusão homogênea (linear). No caso de  $D$  ser dependente de  $u$ , ou seja, a filtragem dependente do espaço, a difusão será não homogênea (não linear).

A filtragem por difusão linear tem duas desvantagens (WEICKERT et al., 1997; WEICKERT, 1999):

- Problemas de difusão: A informação semanticamente útil é eliminada do mesmo modo que o ruído. Como a filtragem de difusão linear é projetada para não ser comprometida, não é possível incorporar informações de orientação para polarizar a evolução do espaço escala em direção a uma tarefa desejada, por exemplo, detecção de borda;
- Problemas de localização: A filtragem de difusão linear desloca as estruturas quando se desloca das escalas mais finas para as mais grossas. Portanto, estruturas



que são identificadas em uma escala grosseira devem ser rastreadas até a imagem original para obter sua localização correta. Na prática, isso pode ser difícil de lidar gerando instabilidades.

Como alternativa a estas limitações Perona e Malik (1987, 1990) propuseram um método de difusão não linear que reduz a difusividade nos locais que têm maior probabilidade de serem bordas, caracterizados por gradientes maiores. Os autores chamaram este processo de anisotrópico. Weickert (1999) considera o filtro de Perona-Malik como um modelo isotrópico não uniforme, isto porque revela uma difusividade de valor escalar e não um tensor de difusão.

No modelo de Perona e Malik,  $\Omega$  denota o domínio da imagem, tal que  $g(x): \Omega \rightarrow R$ . A imagem filtrada  $u(x, t)$  no instante  $t$  é obtida como a solução da equação de difusão:

$$\partial_t u = \operatorname{div} (D(|\nabla u|^2) \nabla u) \quad \text{no } \Omega \times (0, \infty) \quad (12)$$

com a imagem original como condição inicial ( $t=0$ ), dada por:

$$u(x, 0) = g(x) \quad \text{no } \Omega \quad (13)$$

e refletindo as condições de contorno ( $\partial_n$  denota a derivada normal ao limite da imagem  $\partial\Omega$ )

$$\partial_n u = 0 \quad \text{no } \partial\Omega \times (0, \infty) \quad (14)$$

é proposta a difusividade

$$D(|\nabla u|^2) = \frac{1}{1+|\nabla u|^2/\lambda^2} \quad (\lambda > 0), \quad (15)$$

com  $\lambda$  sendo um parâmetro de contraste adicional. Uma discussão das implicações deste modelo pode ser encontrada em Weickert (1999).

Catté et al. (1992) propuseram alterações no processo Perona-Malik, regularizando o gradiente dentro da difusividade  $D$  aplicando uma convolução com o Gaussiano  $K_\sigma$  com desvio padrão  $\sigma > 0$ . Assim, o filtro fica:

$$\partial_t u = \operatorname{div} (D(|\nabla u_\sigma|^2) \nabla u), \quad (16)$$

onde,  $u_\sigma = K_\sigma * u$ .

O efeito regularizador da modificação se dá pelo fato de que  $|\nabla u_\sigma|$  permanece limitado. Além disso, uma convolução com o Gaussiano  $K_\sigma$  torna o filtro insensível às estruturas em escalas menores que  $\sigma$  (NITZBERG e SHIOTA, 1992; FRÖHLICH e WEICKERT, 1994). Este modelo é eficiente para eliminação do ruído dentro de uma região, mas nas bordas a difusão é inibida pois  $|\nabla u_\sigma|$  é grande. Considerando que existe uma necessidade para a difusão ao longo das bordas e isso não pode ser feito com uma difusividade de valor escalar, é preciso, então, usar uma matriz de difusão (tensor de difusão), implicando em um filtro de difusão anisotrópica que leva em consideração o contraste da borda e a sua direção (WEICKERT, 1999).

Isto pode ser obtido através da construção do sistema ortonormal dos autovetores  $v_1, v_2$  do tensor de difusão  $D$  tal que  $v_1 \parallel \bar{\nabla}u_\sigma$  e  $v_2 \perp \bar{\nabla}u_\sigma$ . Para a suavização ao longo da borda pode-se escolher os autovalores correspondentes  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  como (WEICKERT, 1996):

$$\lambda_1 = D(|\nabla u_\sigma|^2), \quad (17)$$

$$\lambda_2 = 1. \quad (18)$$

Em geral,  $\bar{\nabla}u$  não é paralelo a um dos autovetores de  $D$ , enquanto  $\sigma > \theta$ . Portanto, o comportamento desse modelo é realmente anisotrópico. Se deixar que o parâmetro de regularização  $\sigma$  tenda a  $\theta$ , o processo se reduz ao modelo de Perona-Malik (WEICKERT, 1999).

A anisotropia em processos de difusão permite ainda processar estruturas de linhas. Weickert (1995, 1999), utilizando o modelo anisotrópico de Cottet e Germain (1993) projetado para o aprimoramento de estruturas coerentes, apresenta o conceito de *Coherence Enhancing Anisotropic Diffusion* (CED). O autor sugere o uso de um descritor para orientação local mais robusto que  $\bar{\nabla}u_\sigma$ , como um tensor de estrutura (JÄHNE, 2004):

$$J_\rho(\nabla u_\sigma) = \kappa_\rho * (\nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^T). \quad (19)$$

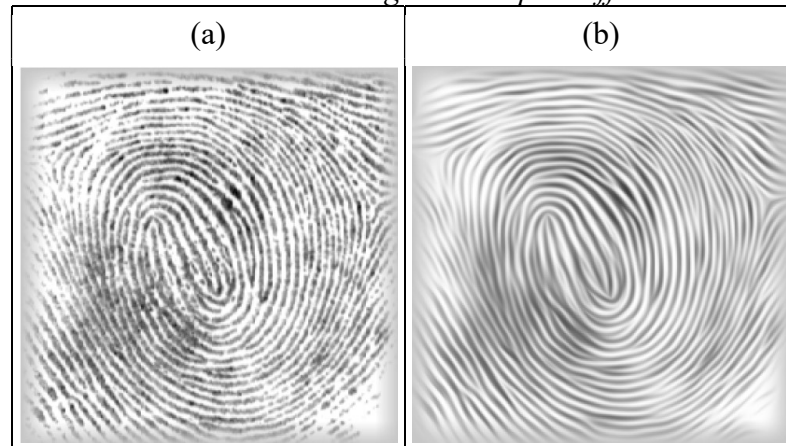
A convolução do componente com o Gaussiano  $K_\rho$  mede a informação de orientação em uma escala de integração  $\rho$ . Como  $J_\rho$  é uma matriz simétrica semidefinida positiva, existe uma base ortonormal dos autovetores  $v_1$  e  $v_2$  com os autovalores correspondentes  $\mu_1 \geq \mu_2 \geq 0$ . Segundo Weickert (1999), os autovalores medem o contraste médio (variação do valor cinza) nas autodireções dentro de uma escala  $\rho$ . Portanto,  $v_1$  é a orientação com as maiores flutuações de valores de cinza e  $v_2$  dá a orientação local preferida, a direção de coerência. A expressão  $(\mu_1 - \mu_2)^2$  é a medida da coerência local. Weickert (1999) aponta que para aprimorar estruturas coerentes, deve-se suavizar principalmente ao longo da direção de coerência  $v_2$  com uma difusividade  $\lambda_2$  que aumenta em relação à coerência  $(\mu_1 - \mu_2)^2$ . Isso pode ser realizado projetando  $D$  de modo que ele possua os mesmos autovetores  $v_1, v_2$  como  $J_\rho$  e escolhendo seus autovalores correspondentes como:

$$\lambda_1 = \alpha \quad (20)$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} \alpha & \text{if } \mu_1 - \mu_2, \\ \alpha + (1 - \alpha) \exp\left(\frac{-c}{(\mu_1 - \mu_2)^2}\right) & \text{else} \end{cases} \quad (21)$$

onde  $c > 0$ . O parâmetro  $\alpha \in (0, 1)$  é introduzido principalmente por razões teóricas (Weickert, 1999). O filtro de difusão incentiva a suavização ao longo da orientação de coerência  $v_2$  e, portanto, é adequado para fechar linhas interrompidas, conforme observado na Figura 13.

Figura 13. Imagem de 256 x 256 pixels com impressão digital (a) original e (b) suavizada por *Coherence Enhancing Anisotropic Diffusion*.



Fonte: Weickert (1995).

Com a imagem com as bordas recuperadas pela suavização coerente, é possível a aplicação de um detector de linhas.

c) Detector de linhas de Steger

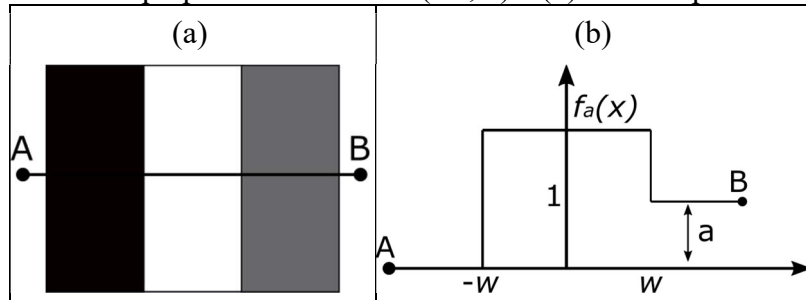
O detector de linhas de Steger (STEGER, 1996; STEGER, 1998; STEGER, 2000, STEGER, 2013) é amplamente utilizado para extração de feições lineares no campo da visão computacional (LIU et al., 2016; LI et al., 2017). No contexto das feições cartográficas, o grupo liderado por Dal Poz tem utilizado esse algoritmo há uma década. Zanin et al. (2007) apresentaram o comportamento geral do detector de linhas de Steger e os parâmetros envolvidos; Ishibashi e Dal Poz (2008, 2009) propuseram estratégias de escolha automática de limiares dos parâmetros para imagens de baixa e média resolução; Mendes e Dal Poz (2010, 2011) e Fernandes et al. (2017) utilizaram o detector para obter a descrição de vias em imagem de intensidade de pulso LASER; e Marcato e Dal Poz (2011, 2012) extraíram os contornos de cumeeiras de edifícios em imagens de alta resolução. A seguir será apresentada a definição do detector de linhas de Steger.

Bordas e linhas, obtidas da combinação de duas bordas, podem ser modeladas de forma unidimensional no espaço bidimensional  $R^2$ , como estruturas curvilíneas caracterizadas pelo atributo intensidade (tons de cinza) em perfis perpendiculares. Em um modelo de linha de largura  $2w$  e intensidade 1, com bordas de mesma polaridade e diferentes contrastes (Figura 14a), o perfil perpendicular obtido será do tipo barra assimétrica (Figura 14b), modelado pela Equação 22 com  $a \in [0,1[$ . Este perfil tem um comportamento muito próximo ao gerado por

rodovias nas imagens de baixa e média resolução em sensoriamento remoto (ISHIBASHI, 2008).

$$f_a(x) = \begin{cases} 0, & x < -w \\ 1, & |x| \leq w \\ a, & x > w \end{cases} \quad (22)$$

Figura 14. (a) Perfil AB perpendicular à linha ( $2w, 1$ ) e (b) seu comportamento assimétrico.



Para detectar linhas com este perfil, em uma imagem unidimensional  $z(x)$  sem ruídos, deve ser determinado o ponto onde  $z'(x)$  se anula, selecionando somente as linhas mais salientes, utilizando o valor de magnitude da segunda derivada  $z''(x)$  no ponto onde  $z'(x) = 0$ , sendo as mais importantes aquelas que  $z''(x) \ll 0$  para linhas claras e  $z''(x) \gg 0$  para as linhas escuras. Este cenário (sem ruído) não é corriqueiramente encontrado em imagens de sensoriamento remoto. Dessa forma, uma alternativa é estimar as derivadas de  $z(x)$  pela convolução da imagem com as derivadas do núcleo Gaussiano com desvio-padrão  $\sigma$ , dadas por (STEGGER, 2000):

$$g_\sigma(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (23)$$

$$g'_\sigma(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (24)$$

$$g''_\sigma(x) = \frac{x^2 - \sigma^2}{\sqrt{2\pi}\sigma^5} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (25)$$

conduzindo a seguinte descrição através do espaço escala do perfil da linha,  $f_a(x)$ :

$$r_a(x; \sigma; w; a) = g_\sigma(x) * f_a(x) = \varphi_\sigma(x + w) + (a - 1)\varphi_\sigma(x - w), \quad (26)$$

$$r'_\sigma(x; \sigma; w; a) = g'_\sigma(x) * f_a(x) = g'_\sigma(x + w) + (a - 1)g'_\sigma(x - w), \quad (27)$$

$$r''_\sigma(x; \sigma; w; a) = g''_\sigma(x) * f_a(x) = g''_\sigma(x + w) + (a - 1)g''_\sigma(x - w), \quad (28)$$

com  $\varphi_\sigma(x)$  sendo a integral do núcleo Gaussiano dada por:

$$\varphi_\sigma(x) = \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt. \quad (29)$$

Assim, a posição da linha é dada pelo ponto de máximo (para linhas claras) ou mínimo (para linhas escuras) de  $r_a(x; \sigma; w; a)$ , isto é, pelos pontos em que  $r'_a(x; \sigma; w; a) = 0$ . O valor de

$r_a''(x; \sigma; w; a)$  é utilizado para selecionar as linhas mais importantes. Para o caso de linhas claras, as mais importantes são aquelas em que  $r_a'' \ll 0$  e para linhas escuras são as que  $r_a'' \gg 0$ . Para preservar a integridade das linhas mais importantes é necessário estimar um desvio-padrão tal que (STEGGER, 1998):

$$\sigma \geq \frac{w}{\sqrt{3}}. \quad (30)$$

Com  $\sigma$  obtido da solução da equação:

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} (r_a''(0; \sigma; w; h)) = 0, \quad (31)$$

garantindo que  $r''$  é máximo (linha escura) ou mínimo (linha clara) nos pontos pertencentes a linha ( $x = 0$ ). A posição da linha pode ser determinada por (STEGGER, 1998):

$$x = -\frac{\sigma^2}{2w} \ln(1 - a). \quad (32)$$

Assim, a linha será extraída na posição correta ( $x = 0$ ) somente se os contrastes em ambos os lados da linha forem iguais, ou seja,  $a = 0$ . É possível estender esse conceito para descrever a extração da largura da linha, conforme tratado em Steger (2000).

Numa imagem digital as estruturas curvilíneas em 2D (linhas) podem ser modeladas como uma curva paramétrica  $s(t)$ , que exibem um perfil de linha 1D característico (Equação 22) na direção transversal. Logo, deve-se analisar a direção transversal à linha em um dado ponto  $p$  de  $s(t)$ , correspondente ao vetor normal  $\vec{n}(t)$  e assim, extrair pontos ao longo das linhas utilizando a primeira derivada direcional na direção  $\vec{n}(t)$ . Logo, o problema se resume a determinar a direção  $\vec{n}(t)$  em cada ponto da linha. Essa direção pode ser obtida a partir do autovetor  $(n_x, n_y)$  correspondente ao autovalor de maior magnitude da matriz Hessiana  $H(x, y)$  da imagem suavizada (STEGGER, 1998), dada por:

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix}, \quad (33)$$

com  $r_{xx}$  sendo a derivada segunda em relação à direção  $x$ ;  $r_{yy}$  sendo a derivada segunda em relação à direção  $y$ ; e  $r_{xy}$  sendo a derivada mista todos tomados na imagem suavizada. Os autovalores ( $\lambda$ ) de  $H(x, y)$  são determinados pela Equação 34, onde  $\det$  é o determinante matricial, e a partir deles são determinados pela Equação 35 os autovetores responsáveis pela direção transversal à linha  $(n_x, n_y)$ .

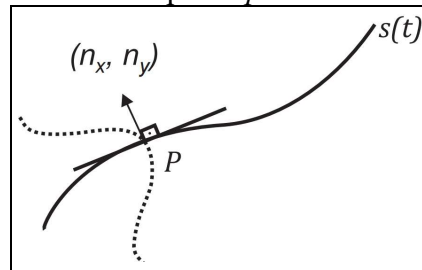
$$\det(H(x, y) - I\lambda) = 0 \quad (34)$$

$$(H(x, y) - I\lambda)X = 0 \quad (35)$$

Ishibashi (2008), baseada em Steger (1998, 2000), aponta a necessidade de modelar localmente a imagem com o polinômio de Taylor de segunda ordem, a fim de determinar onde

a primeira derivada direcional em  $(n_x, n_y)$  se anula, ou seja, a melhor localização do ponto de linha  $p$  no perfil transversal em análise (Figura 15).

Figura 15. Perfil transversal à linha num ponto  $p$  modelado através da expansão de Taylor.



Fonte: Mendes e Dal Poz (2011).

Este ponto pode ser obtido inserindo  $(tn_x, tn_y)$  no polinômio de Taylor, obtendo posteriormente o valor de  $t'$  que minimize o polinômio (STEGGER, 1998). As coordenadas  $(t'n_x, t'n_y)$  correspondem a um ponto de linha com precisão sub-pixel. Para ser validado, a derivada segunda do polinômio em  $t'$  deve ser, segundo um limiar, muito grande para linhas claras ou muito pequeno para linhas escuras. A análise do histograma de segunda derivada pode fornecer esse limiar, visto que os pontos de linha bem definidos na imagem corresponderão a valores altos, em módulo, da segunda derivada e com baixa frequência. Este processo deverá ser repetido para todos os pontos (ISHIBASHI, 2008; MENDES e DAL POZ, 2011).

### 2.2.2 Inferência de Mapas

As trajetórias obtidas por *crowdsourcing* que apresentam grande potencial para a geração de conhecimento a respeito das malhas de rodovias são aquelas coletadas por equipamentos de navegação e monitorização fixados em veículos automotores (base dos Sistemas de Transporte Inteligente), ou por dispositivos móveis transportados pelo usuário como *smartphones* e *smartwatches* que fazem uso dos Serviços Baseados em Localização. O processamento desses dados pode ter como objetivo a produção de informações e/ou a confecção de uma descrição geométrica e topológica das vias trafegadas.

Quando se deseja obter informações a respeito das rodovias a mineração de dados de trajetória GPS se estabelece como uma promissora área de pesquisa que envolve ciência da computação, sociologia e geografia. Zheng (2015) apresenta um paradigma de mineração que inclui processos para:

- Minimizar as incertezas características deste tipo de dado (DAI et al., 2016);

- Analisar os padrões de mobilidade (CHEN e CHIANG, 2016; QIU e PI, 2016);
- Classificar as trajetórias (SIMONCINI et al., 2016; JI et al., 2016);
- Identificar anomalias de fluxo (BANERJEE et al., 2016).

No entanto, se o interesse for obter uma descrição geométrica e topológica das vias, a pesquisa se aproximará da inferência de mapas de rodovia, que se fundamenta como um problema em se produzir uma descrição das vias, geralmente por meio de um grafo, a partir de um conjunto de trajetórias GPS de entrada. O grafo que modela a rede rodoviária, pelo menos inicialmente, é do tipo geométrico não direcionado, normalmente incorporado em  $R^2$  com vértices (pontos) descrevendo intersecções e arestas (linhas poligonais) representando os eixos das vias (ZHENG e ZHOU, 2011). Apesar de já haver processos integrados de mineração de dados e inferência de mapas bastante sofisticados, como o trabalho de Chen et al. (2016), aqui será abordado somente os métodos de inferência em virtude do particular interesse na geometria das vias.

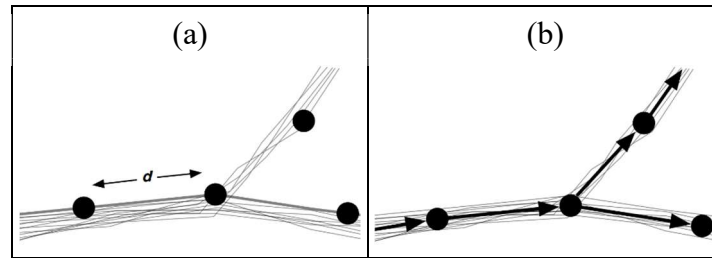
Ahmed et al. (2015) propõe uma classificação dos algoritmos de inferência de mapas de rodovias organizando-os em três categorias, que são: Agrupamento de Pontos (*Point Clustering*), Inserção Gradual de Trajetória (*Incremental Track Insertion*) e Conexão por Intersecção (*Intersection Linking*). Estas classes são uma readequação e ampliação daquelas originalmente propostas por Biagioni e Eriksson (2012a).

#### a) Inferência de Mapas por Agrupamento de Pontos

Os métodos de inferência de mapas por Agrupamento de Pontos operam com todos os pontos das medições GPS que formam as trajetórias ou uma amostra suficientemente densa, empregando técnicas como o particionamento *K-Means* ou as estimativas de densidade. Esta é a classe com os algoritmos mais populares na literatura científica (AHMED et al., 2015).

Apesar de haver variações, normalmente os algoritmos *K-Means* operam com dados tridimensionais (latitude, longitude, direção). O processo inicia com a distribuição de pontos sementes em distâncias pré-determinadas  $d$  ao longo das trajetórias (Figura 16a) que darão origem a *clusters* por um processo convencional de agrupamento. Depois que todos os pontos forem agrupados os centroides são conectados de acordo com alguma diretiva, delineando assim o eixo das trajetórias (Figura 16b). Um dos trabalhos pioneiros no uso de *K-Means* para inferência de rodovias por trajetórias GPS foi desenvolvido por Edelkamp e Schrödl (2003).

Figura 16. (a) Pontos sementes para criação de clusters e (b) conexão dos centroides gerados.



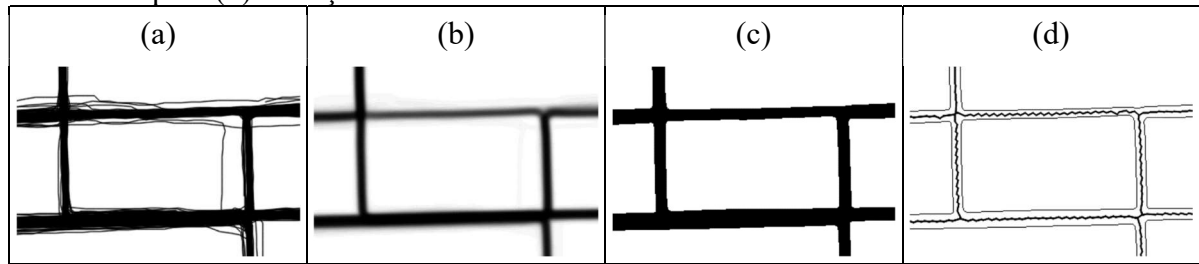
Fonte: Biagioni e Eriksson (2012a).

Uma das vantagens do *K-Means* é a possibilidade de identificar os sentidos de tráfego das vias, uma vez que utiliza a informação de direção da trajetória no processo. Pode-se ainda, ao acrescentar a informação de altitude, trabalhar com coordenadas em quatro dimensões (latitude, longitude, altitude, direção). O algoritmo *K-Means* não apresenta bons resultados com dados escassos ou dispersos, produzindo segmentos espúrios e comprometendo sua precisão, conforme constatado por Liu et al. (2012). Outra questão a ser considerada é o fato do processo não ser incremental, ou seja, para novos dados serem inseridos todo o conjunto original de pontos deve ser reprocessado.

Outra técnica bastante utilizada para inferência de mapas de rodovias por agrupamento de pontos é o *Kernel Density Estimators* (KDE). De forma geral, os métodos KDE iniciam com o cálculo de uma estimativa de densidade do núcleo a partir dos pontos das trajetórias (Figura 17a), normalmente aproximada por um histograma bidimensional, que é um estimador não-paramétrico. Os pontos que formam as trajetórias são projetados numa grade de coordenadas euclidianas com células de dimensões regulares previamente definidas. Cada célula em que o ponto foi projetado, bem como as células que estão entre dois pontos consecutivos e não adjacentes, registram a frequência de pontos incidentes em sua área (Figura 17b). Assim, as células com frequências mais altas terão grande probabilidade de serem parte da rodovia. Como este tipo de estimativa é local, faz-se necessária aplicar uma suavização para evitar que células de baixa frequência rodeada por células de alta provoquem discontinuidades. Após a suavização um limiar é utilizado para remover baixas densidades, gerando uma imagem binária (Figura 17c) que será submetida às técnicas de processamento digital de imagens para produzir os eixos das densidades, que corresponderão aos eixos das rodovias (Figura 17d). No trabalho de Davies et al. (2006) foram utilizadas técnicas de PDI para se extrair as bordas das densidades binarizadas e a partir delas produzir um Diagrama de Voronoi, que após filtragens forneceu os eixos das rodovias. Já Biagioni e Eriksson (2012) utilizaram a técnica de esqueletização para produzir os eixos a partir de uma estimativa de densidade mantida em tons de cinza.



Figura 17. (a) Conjunto de trajetórias (b) convertidas para uma estimativa de densidade e (c) limiarizada para (d) extração do eixo.



Fonte: Biagioni e Eriksson (2012a).

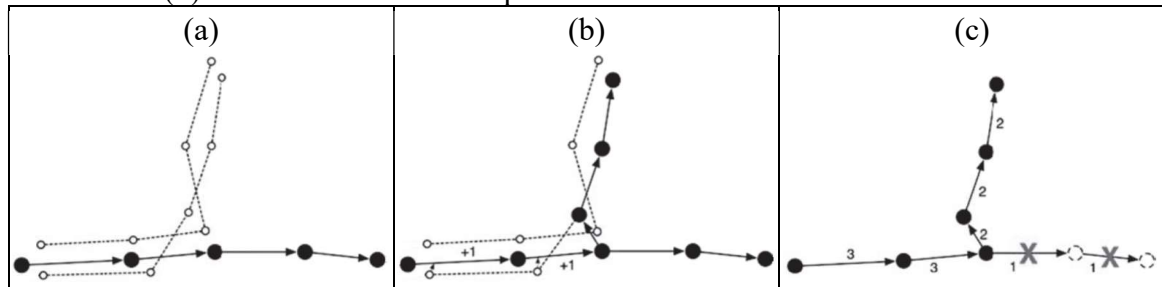
Os vários métodos baseados em KDE demonstraram bastante tolerância a conjuntos de trajetórias ruidosas, mas são dependentes dos parâmetros de suavização e binarização (LIU et al., 2012). Quanto a complexidade do eixo obtido, por adotar a aproximação da estimativa por histograma bidimensional não é possível diferenciar os eixos das rodovias que estão muito próximas. Outro problema trazido pelo processo é que a qualidade do mapa resultante é dependente da dimensão definida para as células da grade. Células de grande dimensão produzem deslocamentos bruscos nos eixos extraídos e células pequenas exigem um grande esforço computacional de processamento e armazenamento na memória. Além disso, não é possível incluir as altitudes no processo. Por fim, o método não é incremental, exigindo o reprocessamento de todo o conjunto de dados caso sejam inseridas novas trajetórias.

#### b) Inferência de Mapas por Inserção Gradual de Trajetória

Os métodos de Inserção Gradual de Trajetória diferem em relação aos métodos vistos anteriormente por ser incremental e não haver redução da dimensão dos dados, pois opera com as trajetórias como sendo linhas poligonais, utilizando para isto técnicas de correspondência, medidas de distância, etc.

Em termos gerais, nos métodos desta categoria todas as trajetórias são candidatas a fazerem parte do mapa de rodovias, que inicialmente está vazio. Depois da primeira trajetória inserida a cada nova tentativa (Figura 18a) é avaliado se a trajetória candidata é geometricamente similar a alguma já existente. Se os critérios de similaridade forem preenchidos a nova trajetória não é inserida e o peso da trajetória correspondente é incrementado (Figura 18b), caso contrário ela é inserida no mapa base como uma nova candidata a descrever uma rodovia. Ao final, quaisquer arestas com peso abaixo de um limiar são removidas (Figura 18c), permanecendo somente o eixo das trajetórias.

Figura 18. (a) Destaque da trajetória candidata. (b) Atribuição de peso às arestas da trajetória de referência. (c) Resultado final com supressão das arestas.



Fonte: Biagioni e Eriksson (2012a).

Nestes processos podem ser incluídas a altitude e a conectividade das trajetórias como critérios de similaridade, permitindo estender o processo para o espaço tridimensional e ainda distinguir as direções das pistas. Por tratar cada trajetória de forma individual o método é relativamente sensível a ruídos e acaba por produzir mapas rodoviários de qualidade inferior aos métodos anteriormente tratados.

### c) Inferência de Mapas por Conexão por Intersecção

A abordagem de Conexão por Intersecção opera com base na identificação dos vértices de intersecções (cruzamentos) utilizando critérios como densidade de pontos, velocidade, mudança de direção, etc, para em seguida interligar os vértices uns aos outros. Um dos primeiros métodos nesta categoria foi proposto por Fathi e Krumm (2010), que faz uso de um descritor treinado previamente com amostras de cruzamentos e representado como um vetor de característica. Esse descritor produz uma classificação dos cruzamentos que é utilizada para interliga-los, descrevendo os eixos das rodovias.

### 2.2.3 Conflação de Feições

Em razão de armazenarem representações de entidades do mundo físico, que está em constante mudança, as bases de dados geoespaciais necessitam de atualizações periódicas para manter seus dados adequadamente completos e acurados, de acordo com o fim a que se destinam. Considerando a pluralidade destes dados e a necessidade de preservá-los, pelos menos nos aspectos estruturais, deduz-se que a atualização das bases de dados geoespaciais envolve um complexo processo de interação entre os novos dados e os preexistentes. O conjunto deste processo é designado no contexto dos SIG pela palavra *conflation*. O termo *conflation* (do latim *con flare* que significa *blow together*), tradicionalmente usado em língua inglesa para

descrever a união de dois manuscritos em uma terceira versão combinada, começou a ser utilizada no contexto cartográfico no final dos anos 70 para designar a combinação de dois arquivos digitais de mapas com o objetivo de produzir um terceiro que é "melhor" do que os originais (LYNCH e SAALFIELD, 1985). Nesta pesquisa o termo conflação é usado como o equivalente a *conflation*, em português, a exemplo da tradução feita para a terceira edição do livro *Sistemas e Ciência da Informação Geográfica (Geographic Information Systems and Science)*, de 2013 (LONGLEY et al., 2013).

Segundo Seth e Samal (2008) a necessidade da conflação surge quando deseja-se atualizar dados geoespaciais num esforço de melhoria da acurácia ou correção da ausência de feições e atributos, utilizando fontes de dados mais recentes com sobreposição de cobertura. Assim, conflação designa um conjunto de processos que combinam duas ou mais representações espaciais da mesma região, para produzir um conjunto de dados superior a soma de suas partes, tanto em aspectos espaciais quanto de atributos (SAALFELD, 1988; LONGLEY et al., 2013). Esta definição tem aspectos que a aproxima da definição tradicional de fusão de dados usada no sensoriamento remoto, o que se deve ao fato do termo *map conflation* ter sido popularizado pelos trabalhos pioneiros de White (1981) e Saalfeld (1988) nos domínios da fusão e integração de dados (RUIZ et al., 2011). É importante salientar que o termo conflação vem sendo usado para designar processos envolvendo dados pertencentes a bases de dados de grande porte, normalmente de órgãos governamentais, organizadas segundo alguma sistemática rigorosa, tal como as normas e padrões INDE, que devem ser preservadas no processo de atualização.

Os primeiros métodos de conflação foram desenvolvidos no início dos anos 80 dentro de agências governamentais norte-americanas, como resultado dos esforços para automação nos processos de compilação de seus acervos de mapas (SETH e SAMAL, 2008). Até então, o processo de compilação de mapas digitais era realizado de forma manual, o que tornava a tarefa cansativa e pouco produtiva. Nos anos seguintes foram desenvolvidos sistemas semiautomáticos nos quais o operador, utilizando um monitor e orientando-se pela imagem, selecionava o par de feições para serem correspondidas via algoritmo computacional (LYNCH e SAALFIELD, 1985). Um sistema para conflação automática foi posto em prática em 1985, como solução para a necessidade de uma extensa compilação de mapas digitais (mais de 5.700 pares), que tinha por objetivo unir as bases de dados do Instituto de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos e da Divisão de Censo dos Estados Unidos (SAALFIELD, 1988).

Nos processos pioneiros a motivação era a eliminação das discrepâncias entre conjuntos de dados que recobriam a mesma área no espaço, ou seja, esses dados se sobrepunham com

diferentes níveis de completeza. Este tipo de problema é solucionado pela chamada Conflação Vertical. Se o interesse for eliminar as discrepâncias ao longo da região de fronteira entre conjuntos de dados adjacentes, será tratada como uma Conflação Horizontal (YUAN e TAO, 1999). Blasby et al. (2003), aponta um terceiro tipo, a Conflação Interna, que é aplicada sobre um conjunto de dados individuais como um processo de eliminação de redundâncias e alinhamento de feições. Este tipo de conflação envolve aspectos da conflação vertical e da horizontal. Independentemente do tipo de conflação a ser executada, os dados a serem utilizados são pontos, linhas e áreas das feições, bem como seus atributos.

Com a redução do custo de criação e manutenção das bases de dados geoespaciais, além da popularização dos arquivos de mapas digitais e dos SIG, vários processos de conflação foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas. A maioria deles opera em três etapas:

- **Pré-Processamento:** Nesta etapa os dados são processados para garantir que fatores como resolução, nível de generalização, escala, formato, projeção, etc, estejam compatíveis para que seja possível relacionar os conjuntos de dados (VEREGIN e GIORDANO, 1994);
- **Processamento:** Esta etapa abriga os processos centrais da conflação para a execução da correspondência, que consiste basicamente em detectar as feições homologas entre os conjuntos de dados e a partir delas determinar uma função de transferência para alinhar a geometria e atributos (DOUCETTE et al., 2013).
- **Consolidação dos Dados:** Nesta etapa são transferidas e/ou combinadas as informações entre os conjuntos de dados de entrada, corrigindo os dados existentes ou criando um novo conjunto de dados.

O conjunto de tarefas que formam a etapa de Processamento da conflação é corriqueiramente designado pelo termo *rubber-sheeting* (WHITE, 1981; SAALFELD, 1985; SAALFELD, 1988; COBB et al., 1998), cujo nome é uma analogia ao comportamento de um pedaço de borracha ao ser deformado para envolver um objeto. O *rubber-sheeting* compreende as seguintes tarefas (SHIMIZU e FUSE, 2003; SONG et al., 2009):

- **Identificar** pontos homólogos entre as feições nos dois conjuntos de dados envolvidos. Isto pode ser obtido por algoritmos automáticos de correspondência ou manualmente via operador, havendo especial cuidado com falsos positivos;
- **Produzir** um TIN (*Triangulated Irregular Network*) para cada conjunto de dados utilizando os pontos homólogos identificados na etapa anterior, fazendo com que os dois conjuntos de dados tenham a mesma configuração do TIN. Os

triângulos, que acabam por definir sub-regiões são então correspondidos e a partir desta correspondência são determinados os parâmetros para uma transformação geométrica;

- **Executar** a transformação geométrica para cada par de triângulos, normalmente a transformação afim no caso de feições lineares, correspondendo o conjunto de origem (precisão mais baixa) e o conjunto de destino (precisão mais alta).

Em teoria, esse processo pode ser iterado, no entanto a combinação de duas etapas é suficiente para uma aproximação entre as malhas de rodovias (SHIMIZU e FUSE, 2003). A principal vantagem desta abordagem de confluência é que as linhas das sub-regiões mantêm suas posições relativas, ou seja, a topologia é preservada.

Apesar do termo confluência ser fortemente associado a operações envolvendo somente dados vetoriais, em razão dos processos pioneiros operarem exclusivamente com vetores, mais recentemente tais processos foram estendidos para outros dados geoespaciais (KOVALERCHUK et al., 2011). Atualmente os processos são aplicados tanto em feições (vetores), quanto em dados matriciais (*raster*), podendo ser do tipo *raster-para-raster*, *vetor-para-vetor* ou *vetor-para-raster*, entre outros.

#### a) Confluência Raster – para – Raster (R2R)

Este tipo de confluência é bastante utilizada na compilação de bases de dados de mapas digitalizados, mas também pode ocorrer de forma mais generalizada entre imagens de sensoriamento remoto e fotogrametria, sendo tratada neste caso simplesmente como registro (DOUCETTE et al., 2013). Pelas características inerentes ao tipo de dado envolvido este processo exige o uso de sofisticados algoritmos de análise de imagens e visão computacional, para identificar as feições homólogas a serem correspondidas em cada conjunto de dados. A Figura 19 apresenta um exemplo de confluência R2R.

Figura 19. Exemplo de confluência R2R entre (a) a imagem e o (b) mapa e o (c) resultado.



Fonte: Chen e Knoblock (2008).

Neste exemplo foi combinado a qualidade geométrica e alto nível de detalhamento da ortoimagem (Figura 19a), com os atributos (tais como nome de vias, pontos de destaque, etc) de um mapa digitalizado (Figura 19b), que resultou em uma ortoimagem com elementos de mapa sobrepostos (Figura 19c). Poderia ter sido realizada a correção geométrica e posicional do mapa pela ortoimagem, inclusive com o fornecimento de dados complementares, tais como os limites de classes de vegetação da cena, obtidas pelo emprego de técnicas de sensoriamento remoto sobre a ortoimagem durante o processo de conflação.

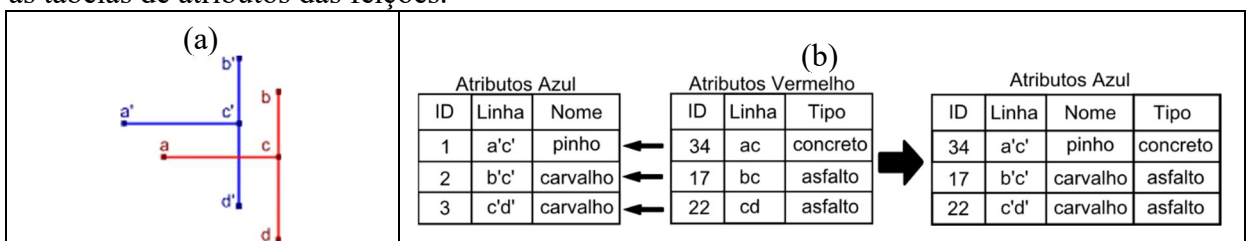
#### b) Conflação Vetor – para – Vetor (V2V)

Esta é a categoria de conflação mais comumente encontrada na literatura. Isto se deve ao fato do vetor ser a entidade básica para a criação de produtos cartográficos digitais, tais como mapas, cartas, etc. Os dados utilizados na conflação V2V podem advir de bases de dados pré-existentes ou de dados *raster*, por meio de uma etapa intermediária de extração e reconstrução das feições em formato vetorial, garantindo a devida completeza e estrutura topológica.

A conflação entre feições vetoriais envolve o alinhamento espacial e a transferência de atributos, assumindo-se, por exemplo, que um conjunto de vetores é geometricamente mais preciso, enquanto outro fornece atributos mais completos. Doucette et al. (2013), apresenta um exemplo de conflação V2V utilizando dois conjuntos de vetores do tipo linhas poligonais, representados pelas cores azul e vermelho, que descrevem uma rede. Cada segmento da linha poligonal possui um conjunto de atributos. No exemplo da Figura 20 é considerado que o conjunto azul possui maior acurácia geométrica, devendo então ocorrer o alinhamento do conjunto vermelho com o azul, por meio da correspondência entre os nós ( $aa'$ ,  $bb'$ ,  $cc'$ , etc).

No primeiro caso (Figura 20a) há compatibilidade total entre as topologias dos conjuntos envolvidos, com os quatro relacionamentos possíveis de cardinalidade do tipo um-para-um. Isto implica que cada nó do segmento vermelho possui um nó correspondente no segmento azul, sendo que um ajuste global aplicado no conjunto vermelho é suficiente para alinhá-los. Neste caso a transferência de atributos se dá pela união dos campos (Figura 20b).

Figura 20. Caso de conflação V2V (a) Representação geométrica da feição (b) Interação entre as tabelas de atributos das feições.

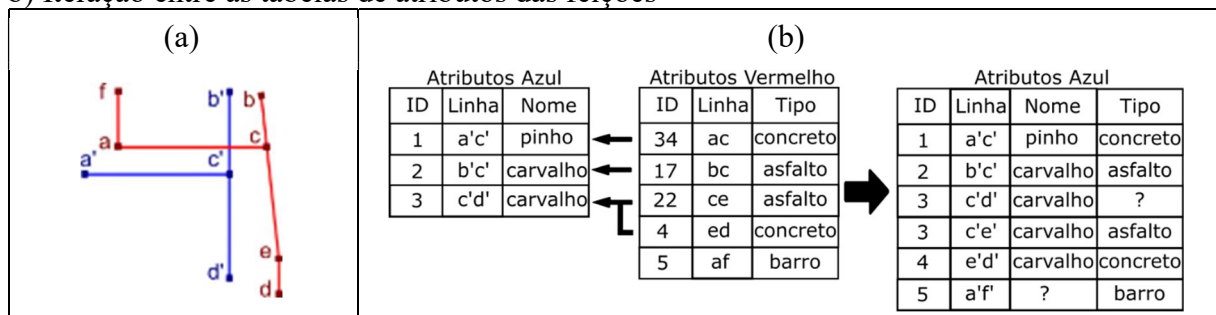


Fonte: Adaptado de Doucette et al. (2013).

O segundo caso (Figura 21a) apresenta ambiguidade pois tanto o nó  $e$  quanto o  $d$  podem ser correspondidos com o nó  $d'$  (cardinalidade muitos-para-um), e não é claro onde posicionar o nó não correspondido. Por fim, o nó  $f$  vermelho não tem correspondência, portanto, a inserção de um novo segmento  $a'f'$  azul deve ser aproximada por um modelo de transferência local.

Neste segundo caso a transferência dos atributos também é uma operação mais complexa. O segmento  $c'd'$  azul apresenta ambiguidade no campo "Tipo" na tabela de atribuição (indicado por "?"), que poderia assumir a descrição do tipo de "asfalto" (original de  $ce$  vermelho) ou "concreto" (original de  $ed$  vermelho), ou ainda uma composição "asfalto e concreto". O campo "Nome" do segmento  $a'f'$  tem valor desconhecido na tabela de atribuição (indicado por "?"). Para mitigar essas situações regras de transferência de atributo devem prever as condições de aceitação e forma de preenchimento destes espaços (Figura 21b).

Figura 21. Caso de confluência V2V com ambiguidade. a) Representação geométrica da feição b) Iteração entre as tabelas de atributos das feições



Fonte: Adaptado de Doucette et al. (2013).

Segundo Chen e Knoblock (2008), as principais abordagens da confluência V2V podem envolver (1) correspondência de dado vetorial baseada nas similaridades da informação geométrica, tais como nós e linhas; (2) Correspondência de dado vetorial com base nas semelhanças de formas, bem como nas semelhanças semânticas dos atributos (COBB et al., 1998); (3) Correspondência de dados vetoriais com coordenadas desconhecidas baseada na distribuição da feição ponto (por exemplo, cruzamento de rodovias).

### c) Confluência Vetor – para – Raster (V2R)

Segundo Song e Keller (2009), esta categoria de confluência ainda é pouco explorada. Os elementos envolvidos são dados vetoriais que estão desalinhados ou incompletos quando tomado como referência um dado *raster*. Note que a confluência *raster-para-vetor* também é possível, com os vetores servindo como referência.

A motivação nesta situação é o conjunto de dados vetoriais estar desalinhado em razão de ter sido obtido de uma fonte com propriedades (radiométrica ou espacial) inferiores, para uma especificação ou escala diferente e não compatível com a atualmente adotada como referência. No exemplo da Figura 22 os dados vetoriais encontram-se deslocados em relação a ortoimagem de referência (Figura 22a) e o processo de conflação V2R fez com que o vetor fosse corrigido e os atributos tabulares internos do vetor (nome das vias) fossem expostos como rótulos sobre a imagem (Figura 22b).

Conceitualmente, a informação espacial sobre os dados vetoriais representa o conhecimento existente sobre a localização e forma aproximada dos elementos homólogos na imagem, melhorando, assim, a precisão e o tempo de detecção das feições correspondentes a partir da imagem, conforme pode ser observado em Chen et al. (2006).

Figura 22. (a) Antes e (b) depois da conflação V2R.



Fonte: Chen e Knoblock (2008).

A automação da conflação V2R é essencialmente uma extensão dos métodos de extração automática de feições (DOUCETTE et al., 2013). A diferença é que na conflação, uma camada de vetor existente pode ser utilizada como conhecimento *a priori* para guiar a extração.

### 2.3 Contorno Ativo Paramétrico

Os contornos ativos ou *snakes* são instâncias particulares dos modelos deformáveis generalizados. Um modelo deformável generalizado pode ser interpretado geometricamente como uma superfície  $n$ -dimensional constituída por um material elástico que se deforma sob a ação de forças internas e externas atuando sobre ele (LI, 1997). Durante o processo de deformação o contorno muda de posição dinamicamente, comportamento que lhe rendeu a



denominação de contorno ativo ou *snakes*, por se assemelhar ao movimento de uma cobra (TREIBER, 2013).

As *snakes* foram introduzidas como tema de pesquisa por Kass et al. (1988) e desde então vários modelos foram desenvolvidos procurando potencializar diferentes aspectos, como por exemplo, os modelos dedicados a ampliar a baixa convergência do modelo original, tais como *Gradient Vector Flow - GVF* (XU e PRINCE, 1997), *Curvature Vector Flow -CVF* (GIL e RADEVA, 2003), *Geodesic GVF - GGVF* (PARAGIOS et al.,2004), *Magnetostatic Active Contour – MAC* (XIE e MIRMEHDI, 2008), entre outros.

Com o desenvolvimento de novos modelos as aplicações das *snakes* também se ampliaram, indo desde tarefas de segmentação de estruturas biológicas complexas em imagens médicas até extração de feições artificiais em dados de Sensoriamento Remoto, tais como rodovias em:

- Dados Laser: Gopfert e Rottensteiner (2009) desenvolveram um algoritmo automatizado para detectar redes de rodovias em imagem de intensidade e Kumar et al. (2017) que delimitaram as bordas das rodovias a partir da nuvem de pontos Laser.
- Imagens Aéreas ou Orbitais: os trabalhos pioneiros de Grün e Li (1997) e mais recentes de Zhao e Wang (2010) e Zhou et. al. (2016);

Assim, havendo demanda de aplicação e o desenvolvimento constante de novas abordagens para o contorno ativo paramétrico, novos modelos surgem na literatura. As discussões apresentadas a seguir têm como base o modelo de *snakes* de rede proposto por Butenuth em uma série de trabalhos (BUTENUTH e HEIPKE, 2005; BUTENUTH, 2006; BUTENUTH, 2008; BUTENUTH e HEIPKE, 2012). Inicialmente será apresentado o modelo tradicional de *snakes* (subseção 2.3.1), para então introduzir o modelo de *snakes* de rede (subseção 2.3.2).

### 2.3.1 *Snakes* Tradicional

Proposta originalmente por Kass et al. (1988) uma curva *snakes* é definida como uma curva paramétrica  $C$ , tal que

$$C(s) = (x(s), y(s)), \quad (36)$$

onde  $s \in [0,1]$  é o comprimento do arco;  $x$  e  $y$  são funções paramétricas de  $s$  que indicam as coordenadas de uma curva 2D fechada.

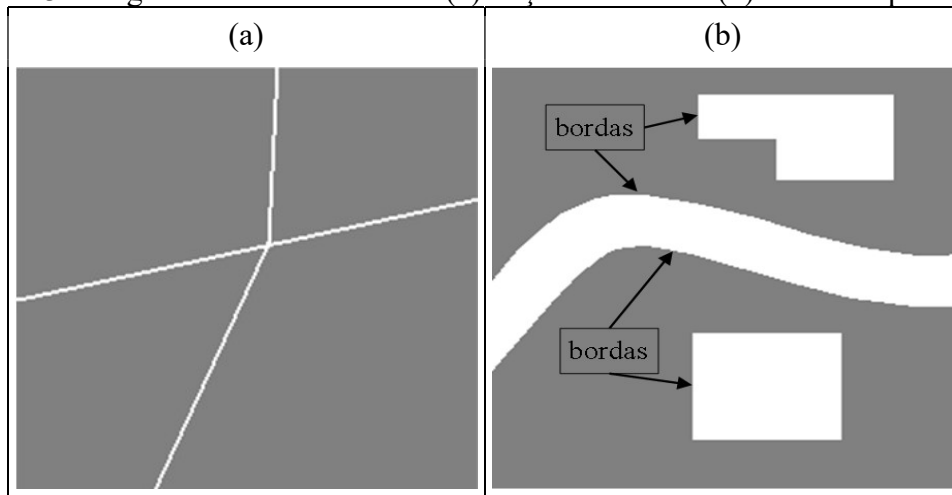
A princípio é desejado que a curva  $C$  evolua em um processo iterativo de forma a delimitar o objeto de interesse na imagem, motivada pela configuração de uma energia funcional que deve ser minimizada ( $E(C(s)) \rightarrow \min$ ), composta pelos seguintes termos (KASS et al., 1988):

$$E(C(s)) = \int_0^1 E_{curve}(C(s)) ds = \int_0^1 [E_{img}(C(s)) + E_{int}(C(s)) + E_{res}(C(s))] ds \quad (37)$$

sendo  $E_{img}(C(s))$  a energia da imagem representando uma descrição do objeto de interesse na imagem em que a *snakes* está inserida;  $E_{int}(C(s))$  é a energia interna associada com o conhecimento *a priori* sobre a forma do objeto, sendo independente da imagem; e  $E_{res}(C(s))$  a energia obtida por uma dada restrição.

A energia da imagem  $E_{img}(C(s))$ , que também pode ser designada como energia externa  $E_{ext}(C(s))$ , descreve o objeto de interesse em termos de suas características na imagem  $I$ , de maneira a mover a curva  $C$  em direção ao seu contorno. Por ser uma energia proveniente do objeto na imagem ela irá variar de acordo com o tipo de feição a ser extraída, podendo, por exemplo, ser adaptada para feições lineares (Figura 23a) ou ainda para feições limitadas por bordas (Figura 23b).

Figura 23. Imagens sintéticas contendo (a) feições lineares e (b) limitadas por bordas.



Fonte: Fazan (2014).

A função de energia externa que descreve a feição sintética da Figura 23a pode ser dada, por exemplo, pela equação (LI, 1997):

$$E_{img_{linha}}(C(s)) = w_{linha} \int_0^1 G^2(x(s), y(s)) ds, \quad (38)$$

onde  $w_{linha} G^2(x(s), y(s))$  é uma função potencial de linha com  $w_{linha}$  sendo uma constante que depende do tipo de linha a ser extraída, normalmente com valores positivos para linhas escuras

e valores negativos para linhas claras; e  $G^2(x(s),y(s))$  sendo o quadrado dos valores de brilho dos pixels que descrevem a linha na imagem.

Já na Figura 23b a feição sintética é limitada por bordas, que representam regiões nas quais os elementos apresentam uma transição abrupta em seus atributos (valores de intensidade). Neste caso a energia externa pode ser dada pela função (LI, 1997):

$$E_{img_{borda}}(v(s)) = w_{borda} \int_0^1 |\nabla G(x(s),y(s))|^2 ds, \quad (39)$$

onde  $w_{borda} |\nabla G(x(s),y(s))|^2$  sendo uma função potencial de linha com  $w_{borda}$  sendo uma constante negativa pois a somatória de magnitudes do gradiente é elevada em pontos de borda; e  $|\nabla G(x(s),y(s))|^2$  sendo o quadrado da magnitude do gradiente nos pontos de borda.

O termo de energia interna  $E_{int}(v(s))$  modela o conhecimento prévio sobre as características da forma e comportamento do objeto de interesse durante a minimização da energia. Assim, uma representação geométrica prévia deste objeto é utilizada para otimizar o comportamento da curva no domínio da imagem, agindo como uma injeção de suavidade, tornando-a mais robusta a ruídos e oclusões (BUTENUTH, 2008). Kass et al. (1988) definem a energia interna como uma combinação linear de derivadas, que pode ser expressa por:

$$E_{int}(C(s)) = \frac{1}{2}(\alpha(s) \cdot |C_s(s)|^2 + \beta(s) \cdot |C_{ss}(s)|^2), \quad (40)$$

onde  $C_s$  e  $C_{ss}$  são a primeira e a segunda derivadas, respectivamente, de  $C$  em relação a  $s$ ;  $\alpha(s)$  e  $\beta(s)$  são funções de ponderação. O termo  $\alpha(s)$  controla a flexibilidade (elasticidade) e  $\beta(s)$  a rigidez (tensão) da curva no ponto parametrizado por  $s$ . Os grandes valores de  $\alpha(s)$  permitem que o contorno se torne muito reto entre dois pontos e dificulte o alongamento, enquanto valores pequenos permitem uma maior flexão. Grandes valores de  $\beta(s)$  permitem que o contorno seja suave e pequenos valores provocam a geração de quinas. Os termos  $\alpha(s)$  e  $\beta(s)$  precisam ser predefinidos com base nas características de forma modelada do objeto de interesse, muitas vezes são corrigidas durante a otimização.

O termo de energia de restrição  $E_{res}(v(s))$  pode opcionalmente incorporar condições particulares, como por exemplo, pontos de referência ( $P_{lm}$ ) que obrigatoriamente devem participar do contorno descrito pela curva, que seria formalizada por:

$$E_{res}(C(s)) = -k|P_{lm} - X_c|^2, \quad (41)$$

onde  $X_c$  é um ponto no contorno  $C$ ;  $k$  é um parâmetro positivo para ponderar a energia. Assim,  $E_{res}(v(s))$  se comportaria fisicamente como uma mola que exerce força para minimizar a distância entre um ponto particular e a curva.

Têm-se então um problema de otimização em que a funcional de energia associada à *snakes* deve ser mínima quando a curva se encontrar sobre a feição modelada por seus termos. Assim, desconsiderando o termo  $E_{res}(v(s))$  a fim de obter uma minimização sem quaisquer restrições, pode-se reescrever a Equação 37 como:

$$E(C(s)) = \int_0^1 [E_{img}C(s) + E_{int}(C(s))]ds \rightarrow Min, \quad (42)$$

A solução da Equação 42 pode ser obtida com o cálculo variacional, como proposto em Kass et al., (1988). O cálculo variacional lida com a procura de uma curva (ou superfície), para o qual uma dada funcional  $F(C)$  sob a forma da Equação 43 tem um mínimo ou máximo considerando as condições de contorno dadas na Equação 44, onde os valores  $C_e > C_b$  são dados e definidos conforme Equação 45.

$$F(C) = \int_0^1 E(s, C, C_s, C_{ss}) ds \quad (43)$$

$$C(0) = C_b, C(1) = C_e \quad (44)$$

$$C_s = \frac{\partial C}{\partial s}, C_{ss} = \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \quad (45)$$

A solução da funcional  $F(C)$  definida na Equação 43 é obtida com a condição

$$C(s) = C_0(s) + \varepsilon\eta(s), \quad (46)$$

onde  $\eta(s)$  é uma função com  $\eta(0) = \eta(1) = \eta_s(0) = \eta_s(1) = 0$ .

Usando a Equação 43 e a Equação 46 a funcional  $F(C)$  é substituída pela função  $F(\varepsilon)$ , obtendo

$$F(\varepsilon) = \int_0^1 E(s, C_0 + \varepsilon\eta, C_{0s} + \varepsilon\eta_s, C_{0ss} + \varepsilon\eta_{ss})ds \quad (47)$$

devendo cumprir a condição:

$$\frac{\partial F}{\partial \varepsilon} = 0 \text{ para } \varepsilon = 0. \quad (48)$$

Usando a expansão de Taylor se obtém,

$$F(\varepsilon) = \int_0^1 \left( E(s, C_0, C_{0s}, C_{0ss}) + \frac{\partial E}{\partial C}(s, C_0, C_{0s}, C_{0ss})\varepsilon\eta + \frac{\partial E}{\partial C_s}(s, C_0, C_{0s}, C_{0ss})\varepsilon\eta_s + \frac{\partial E}{\partial C_{ss}}(s, C_0, C_{0s}, C_{0ss})\varepsilon\eta_{ss} \right) ds. \quad (49)$$

A condição necessária definida na Equação 48 leva a

$$\int_0^1 \eta \left( \frac{\partial E}{\partial C} \right) ds + \int_0^1 \eta_s \left( \frac{\partial E}{\partial C_s} \right) ds + \int_0^1 \eta_{ss} \left( \frac{\partial E}{\partial C_{ss}} \right) ds = 0, \quad (50)$$

e com integração por partes considerando a condição de limite para  $\eta(s)$  tem-se

$$\int_0^1 \eta \left( \frac{\partial E}{\partial C} - \frac{d}{ds} \left( \frac{\partial E}{\partial C_s} \right) + \frac{d^2}{ds^2} \left( \frac{\partial E}{\partial C_{ss}} \right) \right) ds = 0. \quad (51)$$

A integral da Equação 51 desaparece para cada função  $\eta(s)$  resultando em

$$\frac{\partial E}{\partial C} - \frac{d}{ds} \left( \frac{\partial E}{\partial C_s} \right) + \frac{d^2}{ds^2} \left( \frac{\partial E}{\partial C_{ss}} \right) = 0, \quad (52)$$

que representa a equação diferencial de Euler.

Esta solução geral agora é aplicada para a minimização da energia funcional  $E(C(s))$ . Com parâmetros de peso constantes  $\alpha(s) = \alpha$  e  $\beta(s) = \beta$  para simplificar a representação, o  $E(C(s))$  de função de energia dos contornos ativos paramétricos fornecidos na Equação 42 pode ser minimizado resolvendo as equações de Euler correspondente:

$$\frac{\partial E_{img}}{\partial C} - \alpha \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} + \beta \frac{\partial^4 C}{\partial s^4} = 0. \quad (53)$$

Assim, o contorno  $C$  é representado com as Equações 53 para as coordenadas  $x$  e  $y$ , resultando em duas equações independentes. As derivadas dessas equações são então aproximadas por diferenças finitas, uma vez que não podem ser computados analiticamente:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E_{img}}{\partial C} \\ & + \alpha((C_i - C_{i-1}) - (C_{i+1} - C_i)) \\ & + \beta(C_{i-2} - 2C_{i-1} + C_i) - 2\beta(C_{i-1} - 2C_i + C_{i+1}) + \beta(C_i - 2C_{i+1} + C_{i+2}) = 0. \end{aligned} \quad (54)$$

com  $\frac{\partial E_{img}}{\partial C} = f_c(C)$  a Equação 54 pode ser escrita na forma matricial como:

$$AC + f_c(C) = 0. \quad (55)$$

onde  $A$  é uma matriz pentadiagonal de dimensão  $n$ , que depende somente dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . Com substituição de  $a = \beta$ ,  $b = -\alpha - 4\beta$  e  $c = 1 + 2\alpha + 6\beta$  a matriz  $A$  tem a seguinte estrutura para contornos fechados:

$$A = \begin{bmatrix} c & b & a & 0 & \dots & 0 & a & b \\ b & c & b & a & 0 & \dots & 0 & a \\ a & b & c & b & a & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a & b & c & b & a & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & a & b & c & b & a \\ a & 0 & \dots & 0 & a & b & c & b \\ b & a & 0 & \dots & 0 & a & b & c \end{bmatrix}. \quad (56)$$

Uma solução para a Equação 56 pode ser derivada definindo o lado direito igual ao produto de um passo  $\gamma$  e as derivadas de tempo do lado esquerdo. Supõe-se que as derivadas da energia de imagem  $f_c(C)$  são constantes durante um passo de tempo, isto é  $f_c(C_t) \approx f_c(C_{t-1})$ , resultando em um passo explícito de Euler em relação à energia da imagem. Em contraste, a energia interna é um passo implícito de Euler devido à sua especificação pela matriz de banda  $A$ . A equação resultante é

$$AC_t + f_C(C_{t-1}) = -\gamma(C_t - C_{t-1}). \quad (57)$$

As derivadas do tempo desaparecem no equilíbrio. Uma solução pode então ser derivada por

$$C_t = (A + \gamma I)^{-1}(\gamma C_{t-1} - k f_C(C_{t-1})), \quad (58)$$

onde  $I$  é a matriz de identidade e  $K$  é um parâmetro adicional para controlar o peso entre energia interna e de imagem.

A convergência do sistema dado ocorre após  $t$  iterações se:

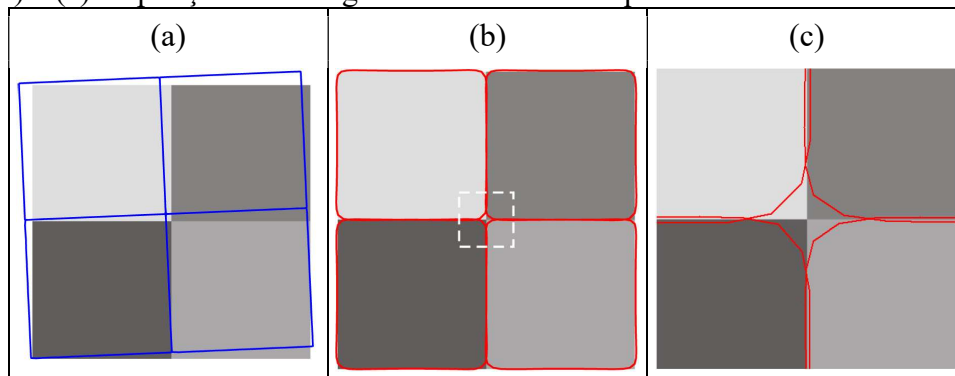
$$|C_t - C_{t-1}| < T \quad (59)$$

onde  $T$  é um limiar pré-estabelecido pelo operador no início do processo de extração.

### 2.3.2 Snakes de Rede

Apesar de eficiente, o modelo tradicional de *snakes* não suporta estruturas com relações topológicas inerentes, como no caso da Figura 24. Pelo modelo tradicional as quatro regiões que formam a figura não podem ser delineadas com um único contorno complexo, exigindo um contorno para cada região. Com isso, mesmo iniciando com um delineamento topológico correto (Figura 24a) a otimização leva a resultados incorretos (Figura 24b) provocando regiões de lacunas e sobreposições (Figura 24c).

Figura 24. Regiões delineadas com *snakes* tradicionais: (a) inicialização (azul), (b) resultado (vermelho) e (c) ampliação do retângulo branco em destaque.



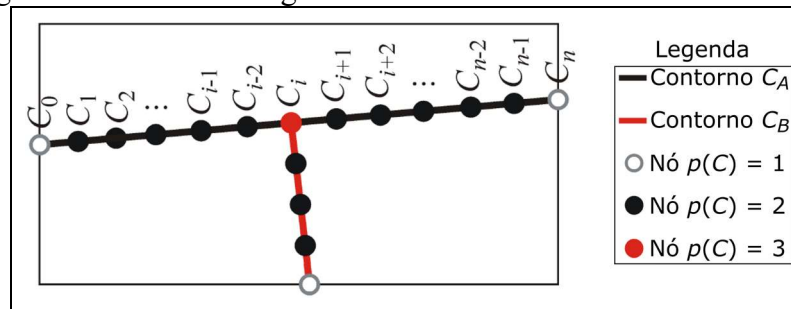
Fonte: Butenuth (2008).

Para contornar este comportamento Butenuth e Heipke (2012) propõem um modelo de *snakes* capaz de evoluir, preservando a topologia original de rede, denominada de *snakes* de rede. Na literatura outros trabalhos já fizeram uso da topologia de diferentes formas na minimização da energia funcional (LEITNER e CINQUIN, 1992; JASIOBEDZKI, 1993; DICKINSON et al., 1994; MCINERNEY e TERZOPOULOS, 1995; LACHAUD e

MONTANVERT, 1999; DELINGETTE e MONTAGNAT, 2001), porém sem uma estruturação matemática suficientemente robusta a ponto de viabilizar um novo modelo de energia que permitisse o movimento livre de qualquer nó da rede.

O termo *snakes* de rede (*network snakes*) foi introduzido por Fua (1995) para designar as arestas a serem deformadas para modelar o contorno 3D de um edifício. As *snakes* de rede de Butenuth e Heipke (2012) utilizam uma estrutura de grafo planar com nós de grau  $p(C)$  para modelar as características topológicas da rede. Nesta estrutura nós com grau  $p(C) = 1$  representam pontos terminais, nós com grau  $p(C) = 2$  os pontos intermediários e nós com grau  $p(C) > 2$  os pontos que conectam mais de duas arestas, ou seja, pontos de cruzamentos. Logo, os nós com grau  $p(C) \neq 2$  definem os pontos de início ou final dos contornos que formam a rede, que podem ser indexados como  $C_A, C_B, \dots, C_Z$ . A Figura 25 apresenta uma rede em grafo formada por dois contornos ( $C_A$  e  $C_B$ ), com nós de graus 1, 2 e 3.

Figura 25. Estrutura em grafo de dois contornos formando uma rede.



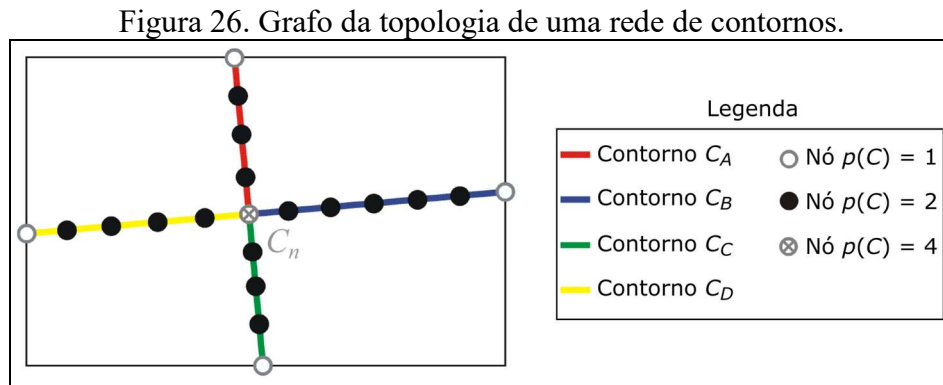
Fonte: Adaptado de Butenuth (2008).

A incorporação da topologia no modelo de energia das *snakes* afeta a minimização da energia funcional, pois sua solução por diferenças finitas requer que, para cada nó  $C_i$  haja dois nós vizinhos em ambos os lados ( $C_{i-1}, C_{i+1}, C_{i-2}, C_{i+2}$ ), conforme Figura 25. No entanto, nos nós de grau  $p(C) = 1$  e  $p(C) = 3$  os nós vizinhos necessários não estão totalmente disponíveis ( $p(C) = 1$ ) ou existem em demasia ( $p(C) > 2$ ). Assim, uma nova definição de energia funcional nos nós com grau  $p(C) \neq 2$  é proposta por Butenuth e Heipke (2012).

Obviamente a inclusão da topologia não afeta a energia da imagem  $E_{img}(C(s))$ , sendo mantida inalterada no desenvolvimento da nova energia funcional. Isto também ocorre com a opcional energia de restrição  $E_{res}(C(s))$ . No entanto, uma nova definição da energia interna  $E_{int}(C(s))$  deve ser desenvolvida para oferecer a possibilidade de representar nós com grau arbitrário, permitindo um controle completo de qualquer parte do contorno. São apresentadas a seguir as formulações da Energia Interna para os casos  $p(C) \neq 2$  e Energia Interna  $p(C) = 1$ , bem como um exemplo sintético.

a) Energia Interna  $p(C) \neq 2$ 

Considerando inicialmente os nós com grau  $\rho(C) > 2$ , como  $C_n$  na Figura 26, têm-se um gráfico representando a topologia formada por quatro contornos ( $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ,  $C_D$ ). Cada contorno é formado por  $n$  nós ( $C_{A0,\dots,n}$ ,  $C_{B0,\dots,n}$ ,  $C_{C0,\dots,n}$ ,  $C_{D0,\dots,n}$ ) e possuem em comum os seus respectivos nós finais ( $C_{A_n} = C_{B_n} = C_{C_n} = C_{D_n}$ ) representados simbolicamente por  $C_n$ , que neste exemplo terá grau  $p(C) = 4$ .



Fonte: Adaptado de Butenuth (2008).

A vizinhança de  $C_n$  inviabiliza o cálculo por diferenças finitas do modelo tradicional das *snakes*. Neste caso, o primeiro termo da energia interna ponderado pelo parâmetro  $\alpha$  será ineficiente na vizinhança de  $C_n$  durante a minimização da energia, pois as diferenças finitas requeridas só estão disponíveis para os dois nós  $C_{n-1}$  e  $C_n$ , mas não para  $C_{n+1}$ . Já o segundo termo da energia interna, ponderado pelo parâmetro  $\beta$ , suportará parcialmente o controle do comportamento da forma na vizinhança de  $C_n$  suportando somente o cálculo das diferenças finitas para os nós  $C_{n-2}$ ,  $C_{n-1}$  e  $C_n$ , mas não para os nós  $C_{n+1}$  e  $C_{n+2}$ . Logo, faz-se necessário reescrever a energia interna na proximidade dos nós  $C_n$  com grau  $\rho(C) > 2$ , usando as diferenças finitas disponíveis  $C_{n-2}$ ,  $C_{n-1}$  e  $C_n$ .

A nova definição da energia interna visa controlar a forma de cada parte do contorno, separadamente, em relação à sua curvatura específica até cada nó  $C_n$  com grau  $\rho(C) \neq 2$  contidos na rede de contorno, assegurando a conectividade dos contornos de terminação nos nós  $C_n$ . Assim, a nova definição da energia funcional é dada por (BUTENUTH e HEIPKE, 2012):

$$\begin{aligned}
 \beta(C_{A_n} - C_{A_{n-1}}) - \beta(C_{A_{n-1}} - C_{A_{n-2}}) + f_{C_A}(C_A) &= 0 \\
 \beta(C_{B_n} - C_{B_{n-1}}) - \beta(C_{B_{n-1}} - C_{B_{n-2}}) + f_{C_B}(C_B) &= 0 \\
 \beta(C_{C_n} - C_{C_{n-1}}) - \beta(C_{C_{n-1}} - C_{C_{n-2}}) + f_{C_C}(C_C) &= 0
 \end{aligned} \tag{60}$$

...



$$\beta(C_{Z_n} - C_{Z_{n-1}}) - \beta(C_{Z_{n-1}} - C_{Z_{n-2}}) + f_{C_Z}(C_Z)=0$$

onde cada linha na Equação 60 representa um contorno  $C_A, \dots, C_Z$  que termina em um nó comum  $C_n$ . Os termos ponderados pelo parâmetro  $\beta$  representam a nova energia interna e os outros termos  $f_{C_A}(C_A), \dots, f_{C_Z}(C_Z)$  a energia da imagem. A definição de energia da Equação 60 permite uma minimização de energia controlando a forma de cada parte de contorno separadamente até o nó comum  $C_n$ , sem interagir em relação à sua forma particular. Ao mesmo tempo, a exploração da topologia é assegurada durante o processo de minimização de energia devido à conectividade.

A nova energia funcional para *snakes* de rede para um nó com um grau  $\rho(C) = 3$ , por exemplo, seria dada pela Equação 60 e sua forma matricial ( $A_n$ ) pela Equação 61.

$$\frac{\partial E_{img}}{\partial C} + \beta(C_{A_{n-2}} + C_{B_{n-2}} + C_{C_{n-2}}) - 2\beta(C_{A_{n-1}} + C_{B_{n-1}} + C_{C_{n-1}}) + 3\beta(C_n)=0 \quad (61)$$

$$A_n C + f_C(C)=0 \quad (62)$$

Assim, a nova matriz ( $A_n$ ) incorpora não somente os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  controlando a forma, mas também a topologia da rede. A matriz A (Equação 56) é adaptada com algumas partes da estrutura originalmente omitidas para dividir as partes de contorno, e outras partes preenchidas para incluir a topologia construindo conexões adicionais entre diferentes partes do contorno. A substituição utilizada para a minimização de energia fica:  $a = \beta$ ,  $b = -\alpha - 4\beta$  e  $c = 1 + 2\alpha + 6\beta$  além da incorporação necessária para os nós com graus de  $\rho(C) > 2$  Para casos de nó com um grau  $\rho(C) = 3$ , são necessárias as substituições de  $d = 1 + 3\beta$ ,  $e = 1 + \alpha + 5\beta$  e  $f = -2\beta$ ; como no exemplo  $A_{n3}$  da Equação 63.

A Equação 63 mostra apenas um nó com um grau  $\rho(C) = 3$  com três partes de contorno  $C_A, C_B, C_C$ , sendo omitido demais partes do contorno. O elemento de matriz incluído nas duas linhas tracejadas representa o nó  $C_n$  com um grau  $\rho(C) = 3$  que liga as três partes de contorno, parte de contorno  $C_A$  à esquerda superior, parte de contorno  $C_B$  na posição intermediária e terceira parte do contorno  $C_C$  demarcada pela linha pontilhada no lado direito inferior. Os elementos adicionais, além da estrutura de bandas, expressam as partes de conexão que representam a topologia dentro da matriz. A estrutura da Equação 63 deixa explícito que a forma de cada parte de contorno é controlada independentemente de qualquer outra parte de contorno, pois não há conexão das respectivas extremidades de contorno em relação à sua forma específica. O único *link* é dado no único nó  $C_n$  representando a topologia dos contornos.

$$A_{n3} = \left[ \begin{array}{cccccccccccc} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \ddots & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & \\ \ddots & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & \\ \ddots & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & \\ \dots & 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & \\ \dots & 0 & a & b & e & f & 0 & 0 & \dots & & & 0 & 0 & & \\ \hline & \dots & 0 & a & f & d & f & a & 0 & \dots & & 0 & f & a & 0 \\ \hline & & \dots & 0 & 0 & f & e & b & a & 0 & \dots & & 0 & 0 & \\ & & & \dots & 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & \\ & & & & \dots & 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & \\ & & & & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & & & & & & & & & & & & 0 & \dots \\ & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & \dots \\ & & & & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \hline & & & & 0 & f & 0 & & \dots & 0 & 0 & 0 & & e & b & a & 0 & \dots \\ & & & & 0 & a & 0 & & & \dots & 0 & 0 & & b & c & b & a & 0 & \dots \\ & & & & & & 0 & & & & \dots & 0 & & a & b & c & b & a & \ddots \\ & & & & & & & & & & & \dots & & \dots & 0 & a & b & c & b & \ddots \\ & & & & & & & & & & & & & \dots & 0 & a & b & c & \ddots \\ & & & & & & & & & & & & & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \end{array} \right] \quad (63)$$

b) Energia Interna  $p(C) = 1$

A nova energia interna deve ainda ser estendida para nós de grau  $\rho(C) = 1$  para permitir a otimização de pontos finais, alcançando a otimização de redes com nós arbitrários. As partes de contorno aberto são representadas dentro de uma rede como contornos  $C_A, \dots, C_Z$  com nós finais  $C_{A_0}, \dots, C_{Z_0}$  com um grau  $\rho(C) = 1$ . Assim, nenhuma outra parte do contorno está conectada nesses pontos.

Neste caso, as diferenças finitas do primeiro termo estão disponíveis apenas para os dois nós  $C_0$  e  $C_1$ , mas não para o nó  $C_{-1}$ , porque este nó não existe. Assim, nenhum controle de forma é possível e o primeiro termo não é considerado durante a minimização de energia no nó  $C_0$  e na proximidade de nós com um grau  $\rho(C) = 1$ . O segundo termo da energia interna, ponderado pelo parâmetro  $\beta$  como parte de toda a energia funcional (Equação 54), pode ser utilizando então para controlar parcialmente o comportamento da forma na proximidade de  $C_0$ . Reescrevendo o segundo termo da Equação 54 com as diferenças finitas disponíveis têm-se:

$$\beta(C_{A_0} - C_{A_1}) - \beta(C_{A_1} - C_{A_2}) + f_{C_A}(C_A) = 0. \quad (64)$$

Agora, as partes de contorno abertas  $C_A, \dots, C_Z$  podem ser otimizadas no nó  $C_0$  e proximidades. A nova energia funcional definida para partes de contorno abertas na Equação

64, que pode ser escrita em forma de matriz usando. Uma matriz  $A_{n1}$  é mostrada como exemplo na Equação 65 para apresentar os detalhes da incorporação de extremidades de contorno abertas:

$$A_{n1} = \begin{bmatrix} a & f & a & 0 & \dots & & & & & & & & \\ f & e & b & a & 0 & \dots & & & & & & & \\ a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & \\ 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & & & \\ & \dots & 0 & a & b & c & b & a & 0 & & & & \\ & & \dots & 0 & a & b & c & b & a & & & & \\ & & & \dots & 0 & a & b & e & f & & & & \\ & & & & \dots & 0 & a & f & a & & & & \end{bmatrix}. \tag{65}$$

com os termos sendo  $a = \beta$ ,  $b = -\alpha - 4\beta$ ,  $c = 1 + 2\alpha + 6\beta$ ,  $e = 1 + \alpha + 5\beta$  e  $f = -2\beta$ .

c) Exemplo sintético

A Equação 66 traz um exemplo sintético de uma matriz  $A_n$  demonstrando sua estrutura para o caso de quatro contornos  $C_A, \dots, C_D$  conectados no nó comum  $C_n$  com grau  $\rho(C) = 4$ . Cada contorno é formado por seis nós  $C_0, \dots, C_5$ .

$$A_n = \begin{bmatrix} a & f & a & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ f & e & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & & & & \\ \dots & 0 & a & b & e & f & 0 & 0 & \dots & & & & 0 & 0 & & & & & & & & & & & \\ \dots & 0 & a & f & g & f & a & 0 & \dots & 0 & & & f & a & 0 & & & & 0 & & & & & & & \\ & & \dots & 0 & 0 & f & e & b & a & 0 & \dots & & 0 & 0 & & & & & & & & & & & & & \\ & & & \dots & 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & \dots & 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & \dots & 0 & a & b & e & f & 0 & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & 0 & \dots & 0 & a & f & a & 0 & 0 & 0 & \dots & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & 0 & f & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & e & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & \\ & & & & & & 0 & a & 0 & \dots & 0 & 0 & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & \\ & & & & & & & 0 & & \dots & 0 & a & b & c & b & a & 0 & \dots & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \dots & 0 & a & b & e & f & 0 & 0 & \dots & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \dots & 0 & a & f & a & 0 & 0 & 0 & \dots & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & \dots & 0 & 0 & 0 & e & b & a & 0 & \dots & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & \dots & 0 & 0 & b & c & b & a & 0 & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & \dots & 0 & a & b & c & b & a & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & \dots & 0 & a & b & e & f & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & & \dots & 0 & a & f & a & & & & & & & & & & & \end{bmatrix} \tag{66}$$

A substituição da minimização da energia das snakes de redes é usada com  $a = \beta$ ,  $b = -\alpha - 4\beta$ ,  $c = 1 + 2\alpha + 6\beta$ ,  $e = 1 + \alpha + 5\beta$ ,  $f = -2\beta$  e  $g = 1 + 4\beta$  para definir a matriz  $A_n$ .

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Nesta seção são apresentados os recursos utilizados no desenvolvimento da pesquisa (subseção 3.1), com a descrição do método proposto (subseção 3.2) e detalhamento dos processos complementares que apresentam grau de ineditismo (subseção 3.3).

#### 3.1 Recursos Materiais

Os recursos materiais utilizados nesta pesquisa são constituídos por dados oficiais disponibilizados por agências governamentais; dados produzidos por equipamentos de baixo custo; ferramentas computacionais obtidas via rede mundial de computadores; e equipamentos do Laboratório de Fotogrametria da FCT/UNESP, Campus de Presidente Prudente.

A manipulação dos dados e as implementações dos algoritmos foram realizadas por meio das seguintes ferramentas computacionais:

- Ambiente de programação *Microsoft Visual Studio Community 2015*, disponível em <https://www.visualstudio.com>, para as implementações dos algoritmos em forma de rotinas nas linguagens *C* e *Python*. Recurso gratuito para pesquisas acadêmicas;
- Biblioteca de primitivas para manipulação de dados geoespaciais *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL), disponível em <http://www.gdal.org/>. Recurso gratuito e livre;
- Biblioteca de rotinas de visão computacional *MVTec Halcon 12* para execução do filtro anisotrópico e do detector de linhas de *Steger*, adquirido pelo projeto Fapesp 2013 sob coordenação do professor Aluir Porfirio Dal Poz e disponibilizado no Laboratório de Fotogrametria da FCT/UNESP, Campus Presidente Prudente;
- Banco de dados *PostGIS* (módulo espacial do *PostgreSQL*) para armazenamento e manipulação dos dados, disponível em <http://postgis.net>. Recurso gratuito e livre;
- Sistema de Informação Geográfica *Quantum GIS (QGIS)*, para a visualização da geometria e atributos dos dados, disponível em <http://www.qgis.org>. Recurso gratuito e livre;

- Sistema de Informação Geográfica *ArcGIS 10.5* para realização da confluência vetor-para-vetor via algoritmo *rubber-sheeting*. Optou-se por utilizar este software em razão dos resultados positivos na confluência automática de feições lineares alcançados por Lee et al. (2014). Recurso licenciado para o Departamento de Cartografia da FCT/UNESP, Campus Presidente Prudente;
- Computador Dell XPS 8700 (Tag 5DC4NZ1) disponibilizado pelo Laboratório de Fotogrametria da FCT/UNESP, Campus Presidente Prudente e adquirido no projeto Fapesp 2013 sob coordenação do professor Aluir Porfírio Dal Poz.

Os dados primários da pesquisa foram selecionados segundo aspectos de disponibilidade, custo, abrangência territorial e acurácia. Estes critérios resultaram nos seguintes conjuntos de dados:

- Dados altimétricos advindos do projeto TOPODATA, disponibilizados no formato *raster* de forma livre e gratuita pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- Ortoimagens *RapidEye 3A* (coberturas 2011 a 2015), de propriedade do Ministério do Meio Ambiente, disponibilizadas no formato *geotiff* de forma gratuita, porém não livre, aos órgãos públicos via *Geo Catálogo MMA*;
- Arquivos vetoriais descritores da malha rodoviária nacional resultantes do Mapeamento Sistemático Topográfico do Brasil na escala 1:250.000 (escala com 100% de cobertura do território nacional), disponibilizados de forma livre e gratuita pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Arquivos de registros de trilhas (*tracks logs*) no formato *gpx* (*GPS Exchange Format*) advindos da BDT do projeto *OpenStreetMap* ou gerados por simulação.

Estes materiais foram selecionados de modo que a pesquisa fosse viável economicamente, relevante academicamente e alcança-se um PEC-PCD aceitável para aplicações cartográficas em território nacional. Neste sentido, e considerando ainda a proposta de integração entre diferentes tipos de dados, foram realizadas avaliações complementares em cada categoria antes de aplicar o método proposto, procurando avaliar as potencialidades e limitações dos dados, cujos resultados são apresentados nas subseções 3.1.1 a 3.1.4.

Para as avaliações dos dados, foi adotado como eixo de referência parte do levantamento em campo realizado por Marcato (2011), que utilizou um receptor GNSS Hipper GGD de dupla frequência operado no modo estático para coleta de pontos de apoio (tempo de rastreamento de 15 minutos) e cinemático para coleta de trajetórias. O processamento dos dados foi realizado

utilizando o método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP *online*) disponibilizado no site do IBGE. Para os pontos de apoio, as precisões obtidas no processamento foram de 50 cm em planimetria e 70 cm em altimetria. As coordenadas coletadas no modo cinemático foram filtradas para eliminar pontos que apresentassem um desvio-padrão maior que 1 m (MARCATO, 2011).

### 3.1.1 Modelo de Elevação SRTM

Nas últimas décadas os sensores ativos têm produzido grandes quantidades de dados altimétricos. Esses dados quando disponibilizados em estruturas tais como a grade regular no formato *raster*, viabilizam a aplicação de algoritmos de processamento digital e análise de imagens e de técnicas fotogramétricas de refinamento e edição (MILLER, 2013). Um exemplo são os dados obtidos por Radar Interferométrico de Abertura Sintética (*Interferometric Synthetic Aperture Radar - IfSAR* ou *InSAR*), que se popularizaram graças a Missão Topográfica por Radar do Ônibus Espacial (*Shuttle Radar Topography Mission - SRTM*), realizada no ano 2000 e que recobriu aproximadamente 80% da superfície terrestre, tornando-se a principal fonte de dados altimétricos mundial (NASA, 2014). Uma descrição detalhada da missão SRTM pode ser encontrada em Farr et al. (2007), já uma explanação dos conceitos de interferometria por radar pode ser vista em Rosen et al. (2000).

Por onze dias a missão SRTM coletou dados por interferometria de passagem única utilizando dois instrumentos independentes, o SIR-C da Agência Espacial Norte Americana (NASA), operando na banda C ( $\lambda = 5,6$  cm) e o X-SAR do Centro Aeroespacial Alemão em parceria com a Agência Espacial Italiana, operando na banda X ( $\lambda = 3,1$  cm) (NASA, 2014). Os dados X-SAR estão sob responsabilidade do Centro Aeroespacial Alemão e não possuem distribuição gratuita. Já os produtos resultantes do processamento dos dados obtidos pelo SIR-C são distribuídos gratuitamente via rede mundial de computadores pelo Instituto de Pesquisas Geológicas dos Estados Unidos (*United States Geological Survey - USGS*), que até 2014 usava diferentes resoluções, com 1 segundo de arco ( $\sim 30$  m) para o território norte-americano e 3 segundos de arco ( $\sim 90$  m) para o restante do mundo. Em dezembro de 2014 a USGS passou a disponibilizar mundialmente o SRTM com resolução de 1 segundo de arco.

Em 2005 a NASA divulgou os resultados de uma extensa avaliação da acurácia dos dados SRTM de 1 segundo de arco, que apontou um erro vertical absoluto de 6,2 m (erro linear com

90% de confiança) e um erro horizontal absoluto de 9 m (erro circular com 90% de confiança) para a América do Sul (RODRÍGUEZ et al., 2005).

Para o Brasil, até dezembro de 2014 a única opção de dados altimétricos de cobertura nacional sem custo eram aqueles produzidos pelo Projeto TOPODATA do INPE, que reprocessou os dados SRTM reamostrando-os de 90 m para 30 m por meio de processos de Krigagem (VALERIANO, 2004; VALERIANO e ALBUQUERQUE, 2010), disponibilizando variáveis de declividade, orientação de vertente, curvatura vertical e horizontal para todo o país.

Para a avaliação da qualidade altimétrica do MDS SRTM foram utilizados dados do projeto TOPODATA e do catálogo USGS SRTM 30 m. Normalmente o cenário rural não apresenta adensamento de edificações nos entornos das rodovias e a vegetação próxima é predominante baixa, fazendo com que o comportamento do MDS ao longo desta feição se aproxime de um MDT (JACOBSEN, 2006).

Foram utilizados 43 pontos de apoio levantados por Marcato (2011), com precisão altimétrica de 70 cm, distribuídos em uma área de aproximadamente 1.250 km<sup>2</sup> com relevo relativamente comportado. Os índices de Erro Máximo, Desvio-Padrão e *Root Mean Square Error* (RMSE) da Tabela 3 foram calculados a partir da discrepância entre os valores de elevação dos pontos obtidos via sistema GNSS e seus respectivos valores no SRTM.

Tabela 3. Indicadores numéricos da qualidade dos SRTM.

Fonte	Erro Máximo (m)	Desvio-Padrão (m)	RMSE (m)
TOPODATA	18,93	3,28	8,26
USGS 30m	20,79	3,26	8,35

Por esses resultados é possível notar que os valores alcançados são semelhantes para os dois produtos. Segundo o PEC-PCD para a produção de MDS, ambos produtos se enquadram na categoria 1:50.000 classe A, a mesma classe alcançada por Barros e Cruz (2007), e inferior ao obtido por Higa et al. (2006), sendo conclusivo que a escala 1:50.000 é adequada. Diante dos resultados alcançados e considerando a comodidade de estarem disponibilizados no *Geo Catálogo MMA*, juntamente com as imagens *RapidEye*, optou-se por utilizar o SRTM do projeto TOPODATA.

### 3.1.2 Ortofoto *RapidEye 3A*

As imagens orbitais *RapidEye* (coberturas 2011 a 2016) foram adquiridas pelo governo brasileiro (BRASIL, 2012) e disponibilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) por

meio de uma base de dados compartilhada via aplicativo web *Geo Catálogo MMA*<sup>4</sup>, com vistas à implantação do Cadastro Ambiental Rural (CAR), cujo objetivo é a regularização das Áreas de Proteção Permanente e Reservas Legais. Estas imagens são disponibilizadas de forma gratuita, porém não livre, para órgãos públicos mediante termo de convênio.

Identificadas pela empresa produtora *BlackBridge*<sup>5</sup> como produto ortorretificado (Nível 3A), sofreram correções radiométricas do sensor e foram ortorretificadas com um MDE de resolução variando entre 30 e 90 m, mais pontos de controle no terreno. Na documentação de descrição técnica consta que a acurácia deste produto irá variar de acordo com a qualidade do MDE e dos pontos de controles utilizados, teoricamente satisfazendo os padrões de mapeamento na escala 1:25.000 (BLACKBRIDGE, 2016).

As imagens *RapidEye 3A* são capturadas com um GSD de 6,5 m no *nadir* e no processo de ortorretificação são reamostradas para 5 m por meio de uma interpolação cúbica, sendo formatadas em recortes de 25 km (5000 linhas) por 25 km (5000 colunas), com 1 km de sobreposição, no datum WGS84 (*World Geodetic System 1984*), sistema UTM (*Universal Transverse Mercator*). A constelação *RapidEye* conta com cinco satélites possibilitando uma cobertura global com revisitas diárias no *off-nadir* ou a cada 5,5 dias no *nadir*. A resolução radiométrica é de 12 bit nas cinco bandas: Azul (440-510 nm), Verde (520-590 nm), Vermelho (630-685 nm), Borda do Vermelho (690-730 nm) e Infravermelho Próximo (760-850 nm) (BLACKBRIDGE, 2016).

Procurando verificar as escalas de aplicação destas imagens segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) foi realizada a avaliação da qualidade posicional absoluta das ortoimagens *RapidEye 3A* para os recortes 2228916 e 2228816, coberturas 2011, 2012, 2013, e 2014, abrangendo a região de João Ramalho, SP. Foram utilizados como dados de referência 43 pontos (MARCATO, 2011), sendo 22 distribuídos no recorte 2228916 e 21 distribuídos no recorte 2228816.

Para a composição dos indicadores quantitativos foram calculadas as discrepâncias nos componentes ( $E$ ,  $N$ ), entre as coordenadas medidas na imagem ( $E_{img}$ ,  $N_{img}$ ) e as coordenadas dos pontos de verificação ( $E_{ter}$ ,  $N_{ter}$ ), possibilitando o cálculo do Erro Posicional ( $R$ ), por

$$R = \sqrt{(E_{img} - E_{ter})^2 + (N_{img} - N_{ter})^2}. \quad (67)$$

---

<sup>4</sup> Sítio do Geo Catálogo MMA <http://geocatalogo.ibama.gov.br>.

<sup>5</sup> Sítio da empresa BlackBridge <http://blackbridge.com/rapideye>.



Foram calculados então o Desvio-Padrão e o RMSE por componente, compondo a Tabela 4.

Tabela 4. Indicadores para a avaliação da qualidade posicional das imagens *RapidEye 3A*.

Ano	Tile	Desvio-Padrão (m)			RMSE (m)		
		E	N	R	E	N	R
2011	2228816	8,09	5,66	5,67	21,41	32,90	39,25
2011	2228916	6,41	6,16	5,93	18,45	37,44	41,75
2012	2228816	4,05	5,06	3,52	4,14	5,45	6,84
2012	2228916	4,82	6,13	3,62	4,71	6,16	7,75
2013	2228816	4,87	4,99	3,61	4,93	5,19	7,15
2013	2228916	3,23	5,74	3,46	3,55	5,77	6,78
2014	2228816	2,24	3,19	1,73	4,46	3,23	5,51
2014	2228916	2,91	4,21	2,14	4,38	4,52	6,30

Ao analisar a Tabela 4 verifica-se que as imagens de 2011 apresentam um grande erro de planimetria. Para verificar se este comportamento se estende a outras imagens do ano de 2011 foi realizada uma avaliação complementar em 20 imagens de diferentes regiões do país. Nesta avaliação as imagens de 2014 foram consideradas como referência e a partir de 10 pontos homólogos coletados entre as coberturas 2014 e 2011 foi calculado o erro médio da componente *R* do conjunto. O resultado desta avaliação foi um erro médio global de 27 m. Assim, considerando ainda que as imagens de 2011 apresentam a pior resposta radiométrica entre as coberturas disponíveis, recomenda-se cautela no seu uso.

Já as imagens das coberturas 2012, 2013 e 2014 tiveram comportamento muito semelhante, alcançando o PEC-PCD Classe A para a escala 1:50.000 e menores. Estes resultados estão condizentes com os resultados alcançados por Machado e Silva et al. (2013) que indicou compatibilidade com a PEC-A de 1:50.000 e Antunes et al. (2014) que enquadrou na PEC-A de 1:20.000. É relevante observar que os resultados publicados por esses autores fazem referência ao PEC e não ao PEC-PCD.

Dentre as características das imagens *RapidEye* se destaca o fato de possuir uma banda espectral na faixa do *red-edge* (localizada entre o vermelho e o infravermelho próximo) e de ter uma resolução temporal com revisitas diárias, tornando-as um insumo bastante utilizado em aplicações ambientais do Sensoriamento Remoto. Assim, é possível encontrar na literatura pesquisas que utilizam estas imagens para:

- Gestão de recursos naturais: como a análise de cobertura florestal (KROSS et al., 2015; ZILLMANN et al., 2015), atividades de inventário florestal (WALLNER

et al., 2015; MUHAMMAD Ali, 2015) e até mesmo a exploração de minas (LUI et al., 2010);

- Monitoramento de desastres ambientais: como a identificação de óleo em corpos d'água (KOLOKOUSSIS, 2011) e detecção de danos provocados por incêndios (JOHN et al., 2015);
- Agricultura de precisão: como a determinação de indicadores do tipo (BEYER et al., 2015) e ritmo de desenvolvimento de uma cultura (SCHÖNERT, 2015), tais como a estimativa do índice de área foliar e biomassa (KROSS, et al., 2015).

Estas aplicações têm em comum o emprego de processamentos típicos do Sensoriamento Remoto, tais como segmentação e classificação, para o delineamento de polígonos descritores das áreas das feições de interesse. No entanto, não é corriqueiro na literatura registros de uso de imagens *RapidEye* em processos de extração de feições lineares, tais como rodovias, sendo uma exceção recente o trabalho de BRAZ e MIURA (2014).

A não adoção em larga escala destas imagens para extração de feições lineares pode estar relacionada com as suas características comerciais, já que as empresas que comercializam imagens de satélite categorizam as *RapidEye* como de média resolução (GSD no nadir maior que 1 m), concorrendo diretamente com as imagens *Spot* (Tabela 5), que são utilizadas para extração de rodovias desde a década de 90 (WANG et al., 1992). Enquanto as imagens *RapidEye 3A* tem custo de US\$ 1,28 por km<sup>2</sup> (licenciado para 1 usuário), as imagens *Spot* são ofertadas com banda pancromática ao custo de US\$3,90 e bandas multiespectrais por US\$ 1,20 (ambas licenciadas para até 5 usuários).

Tabela 5. Valores praticados na comercialização de imagens de média resolução

Plataforma	Sensor	Custo por km <sup>2</sup> (\$)	Área mínima (km <sup>2</sup> )	Custo mínimo (\$)
RapidEye	Multiespectral 3A de 5m na Ortofoto (5 bandas)	1,28	500	640,00
Spot 6/7	Pancromático 1,5m + Multiespectral 6m (R, G, B, NIR)	5,10	100	510,00

Fonte: <http://www.landinfo.com> (2017).

No entanto, considerando que o governo brasileiro disponibiliza a cobertura total do território nacional por imagens *RapidEye* por meio do Catálogo do MMA, com até cinco anos de registros (2011, 2012, 2013, 2014 e 2015), há no cenário nacional uma motivação acadêmica e social para o desenvolvimento de pesquisas explorando este produto.

### 3.1.3 Arquivos Vetoriais do IBGE na Escala 1:250.000

Os resultados do Mapeamento Sistemático Brasileiro na escala 1:250.000, o único que recobre 100% do território nacional (CAMBOIM et al., 2008), é distribuído pelo IBGE no formato *Personal Geodatabase*, que é um formato desenvolvido pela empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) de uso restrito ao software comercial *ArcView* de sua propriedade. Assim, na prática, há a necessidade de conversão do arquivo para o formato *shapefile* de maneira a viabilizar a utilização em outros softwares. Esta forma de distribuição acaba por reafirmar o formato *shapefile* no cenário cartográfico nacional como o principal padrão para dados vetoriais.

Dentre os diferentes arquivos que formam esta base, o arquivo *TRECHO\_RODOVIARIO* é o de interesse nesta pesquisa. Este arquivo descreve a classe Trecho Rodoviário que pertence ao subsistema Rodoviário, que por sua vez faz parte do Sistemas de Transporte, conforme detalhado na subseção 2.1.3. Analisando visualmente a informação presente neste arquivo a partir da sobreposição nas imagens *RapidEye* (cobertura 2014) é possível identificar a presença de falsos positivos e a falta de grandes trechos de rodovias. Foi realizada uma análise numérica a partir de discrepâncias apuradas entre os segmentos de rodovias do arquivo *TRECHO\_RODOVIARIO* e o eixo de referência gerado por Marcato (2011), com extensão de 264 km, que deram origem aos indicadores numéricos de Erro Máximo, Desvio-Padrão e RMSE, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Indicadores numéricos da qualidade dos arquivos *TRECHO\_RODOVIARIO*.

Fonte	Erro Máximo (m)	Desvio-Padrão (m)	RMSE (m)
IBGE	708,51	57,54	67,91

Os valores de RMSE apresenta a esperada discrepância resultante do comparativo entre o eixo de referência produzido numa escala de 1:50.000 e a malha original do IBGE na escala 1:250.000. Dessa forma, o arquivo vetorial em questão, no formato *shapefile*, será utilizado no método proposto na subseção 3.2 como o alvo do processo de atualização, focando na escala de 1:50.000, que é a alcançada pelos principais insumos utilizados (subseções 3.1.1 e 3.1.2).

### 3.1.4 Trajetórias GPS

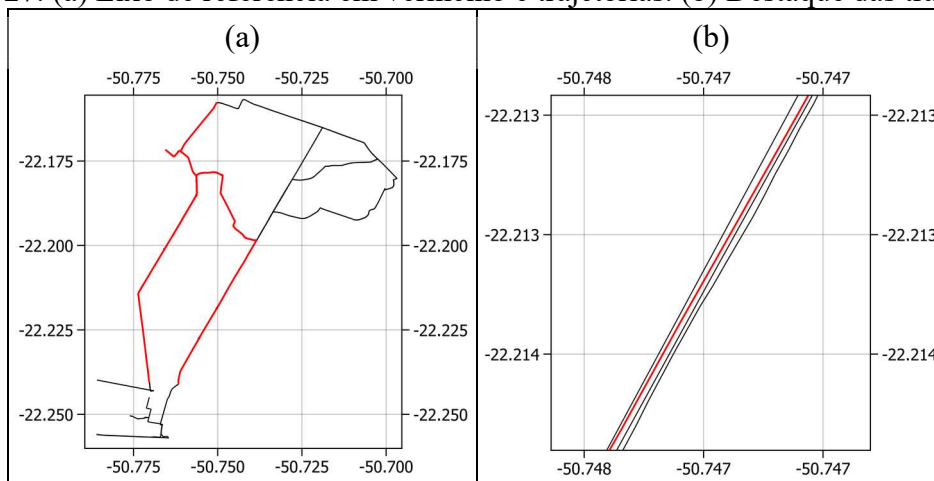
Quanto aos dados de trajetória GNSS, procurou-se verificar se os dispositivos de baixo custo, embarcados em veículos trafegando em rodovias no cenário rural, poderiam gerar

registros de trajetórias suficientemente acurados para serem utilizados como entrada em processos de inferência de mapas, como os descritos na subseção 2.2.2.

Os equipamentos GNSS utilizados nesta avaliação tem valor de mercado inferior a mil reais e são: um navegador GPS automotivo *Garmin Nüvi*<sup>®</sup> 2580TV; um navegador GPS automotivo *Aquarius Discovery*; um GPS de navegação *Garmin GPSMAP*<sup>®</sup> 78; e um smartphone *Motorola Moto G XT1033*. Os equipamentos foram mantidos nas configurações padrão, sendo que os *logs* dos navegadores automotivos foram obtidos pela gravação automática do próprio sistema, enquanto que no smartphone, que opera com o sistema operacional *Android*, foi utilizado o aplicativo *Ultra GPS Logger*. Não foi realizado qualquer tratamento prévio nos dados.

Inicialmente foram gravados 60 km de trilhas na região de João Ramalho, SP, com os quatro receptores trabalhando simultaneamente, para criar um grupo de registros suficientemente extenso de forma a permitir a familiarização com tais dados e a identificação, por meio de uma análise visual, do seu comportamento típico. Para a avaliação numérica foram utilizados 20 km destes registros que correspondem a rodovias não presentes nas bases de dados dos equipamentos, evitando assim qualquer tentativa do software em “corrigir” as trajetórias deslocando-as para uma via de tráfego conhecida. O eixo de referência (MARCATO, 2011) está destacado em vermelho na Figura 27.

Figura 27. (a) Eixo de referência em vermelho e trajetórias. (b) Destaque das trajetórias.



A análise visual não revelou comportamento anormal nos registros (descontinuidades, omissões ou erros de geração do GPX), havendo somente uma esperada variação na taxa de amostragem de pontos em cada equipamento. Para a avaliação numérica foi apurada a discrepância entre os pontos GPS registrados e o eixo de referência. A partir das discrepâncias

foram calculados os indicadores de Erro Máximo, Desvio-Padrão e o RMSE, conforme Tabela 7.

Tabela 7. Indicadores baseados nas discrepâncias entre as trajetórias e o eixo de referência.

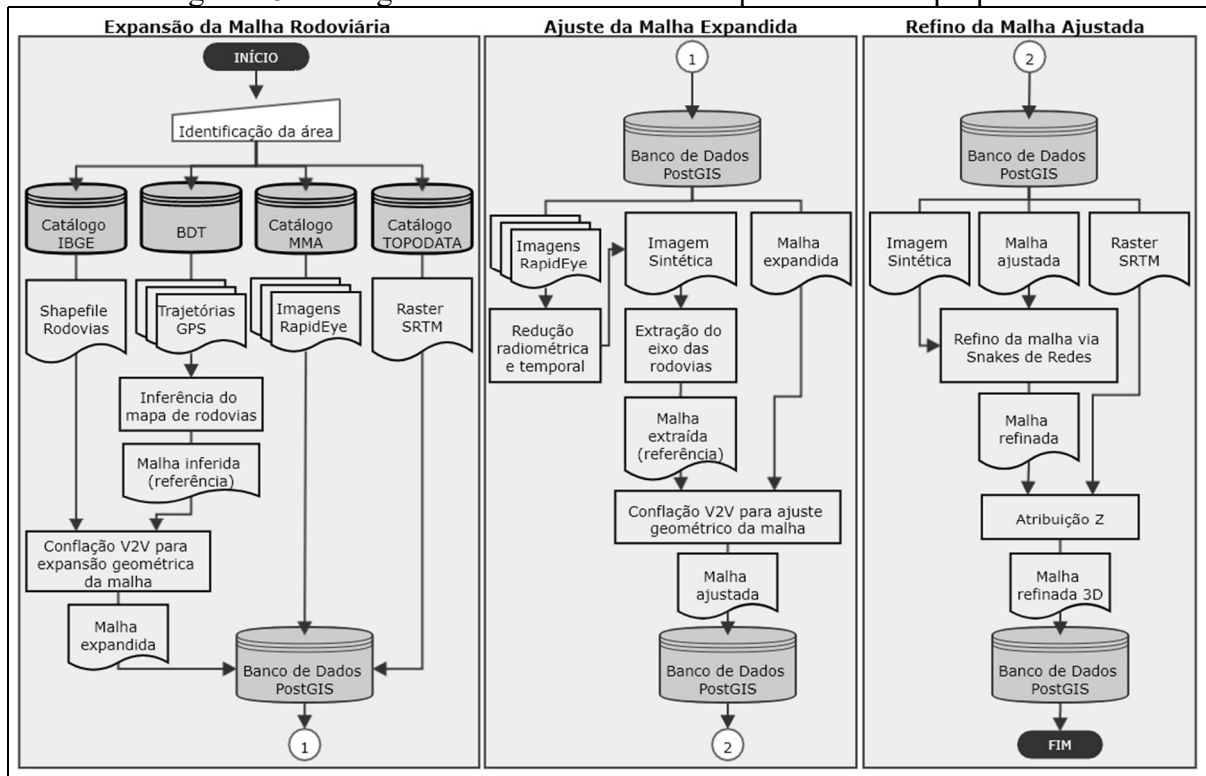
Dispositivo	Categoria do GPS	Erro Máximo (m)	Desvio-Padrão (m)	RMSE (m)
Garmin GPSMAP® 78	Navegação	15,00	3,24	5,29
Aquarius Discovery	Automotivo	14,63	3,15	4,89
Garmin Nüvi® 2580TV	Automotivo	11,26	2,38	3,87
Motorola Moto XT1033	Smartphone	14,79	2,63	5,72

A avaliação numérica indicou que as trajetórias GPS em cenário rural apresentaram um erro máximo de 15 m, bem inferior aos 40 m registrado por Modsching et al. (2006) em cenário urbano. A relevância de avaliar o erro máximo reside no fato de que valores muito grandes de discrepância irão indicar a inviabilidade em relação a tolerância dos processos fotogramétricos quanto a distância máxima entre os pontos sementes e a feição de interesse. Já o RMSE médio dos experimentos ficou abaixo dos 5 m. Estes resultados estão condizentes com a exatidão posicional horizontal esperada para os Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), que podem variar de 1 m até 40 m (QUDDUS et al., 2007). Assim, a avaliação realizada apresentou resultados que comprovam o potencial de uso das trajetórias geradas por equipamentos GNSS de baixo custo como entrada em processos de inferência de rodovias.

### 3.2 Método Proposto

O método proposto nesta pesquisa é constituído por uma sequência de processos operando sobre dados de diferentes naturezas com o propósito de promover a atualização (expansão de ramos, correção geométrica e acréscimo de atributos) em arquivos vetoriais que descrevam malhas rodoviárias, advindos prioritariamente de bases de dados geoespaciais governamentais, tendo como cenário de interesse as áreas rurais. A Figura 28 apresenta o fluxograma completo do método proposto, organizado em etapas de expansão, ajuste e refino da malha rodoviária.

Figura 28. Fluxograma detalhando as três etapas do método proposto.



Parte-se da premissa que o arquivo vetorial de interesse se encontra geometricamente desatualizado, porém contendo um conjunto relevante de atributos, relações topológicas e formatações, característico dos padrões adotados nas IDE. Assim, é primordial a preservação destes aspectos durante o processo de atualização, mantendo a integridade dos dados. Nesta pesquisa foi definido como objeto do método o *shapefile* disponibilizado pelo IBGE resultante do mapeamento sistemático nacional na escala 1:250.000 do sistema rodoviário nacional. Conforme averiguado na subseção 3.1.3, apesar de ser candidato a correções geométricas o arquivo vetorial em questão descreve os eixos das rodovias como uma malha de linhas poligonais topologicamente correta, tendo sido elaborado segundo a normatização descrita na subseção 2.1.3, contando assim com uma série de atributos que devem ser preservados e quando possível atualizados.

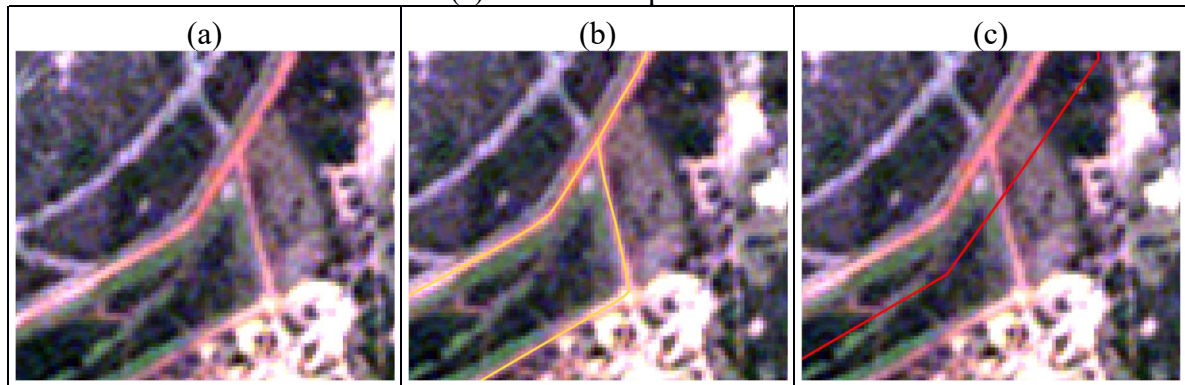
No decorrer das três etapas em que está organizado o método o arquivo vetorial do IBGE sofrerá uma série de modificações geométricas, configuradas em distintos processos que ocorrem no espaço-imagem e espaço-objeto. Começando com uma conflação vetor-para-vetor no espaço-objeto entre o arquivo vetorial do IBGE e o mapa de rodovias inferido a partir de trajetórias GPS, com objetivo de aproximar as malhas de rodovias para que seja possível identificar ramos ausentes na malha e agregá-los (Expansão da Malha); seguida de uma conflação vetor-para-vetor no espaço-objeto entre a malha expandida e os segmentos de eixo

de rodovias extraídos de uma imagem sintética obtida a partir das imagens *RapidEye* (Ajuste da Malha Expandida); finalizando com o refino feito via *snakes* de rede no espaço-imagem e a atribuição da componente altimétrica por meio do SRTM, resultando em um arquivo vetorial geometricamente atualizado e expandido para o espaço tridimensional, com estrutura e atributos preservados. Nas subseções seguintes os processos envolvidos em cada etapa serão detalhados.

### 3.2.1 Expansão da Malha Preexistente

A expansão da malha tem por finalidade acrescentar novos ramos (trechos de rodovias descritos por linhas poligonais) ao arquivo vetorial preexistente (Figura 29), aumentando a sua completude. É fundamental que a expansão seja a primeira etapa do método, para que os ramos adicionados participem das etapas seguintes de ajuste e refinamento geométrico, garantindo a homogeneidade dos resultados.

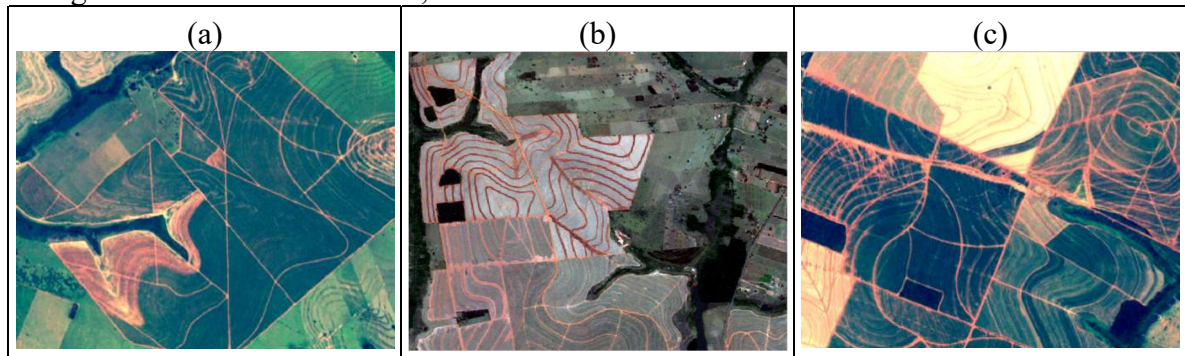
Figura 29. (a) Recorte de imagem com rodovias em área rural. (b) Vetor de referência descrevendo os eixos das rodovias. (c) Eixos no arquivo vetorial IBGE a ser atualizado.



Considerando a disponibilidade das imagens *RapidEye* é natural deduzir que os novos ramos poderiam ser obtidos utilizando-as em processos de vetorização via operador humano ou algoritmos (semi-) automáticos de extração de feições. No entanto, as propriedades da feição de interesse e a complexidade do cenário podem dificultar esses processos a ponto de inviabilizá-los. Isto ocorre porque as feições de interesse, ou seja, as rodovias não pavimentadas, não apresentam a resposta radiométrica característica da manta asfáltica, que é amplamente explorada nos algoritmos de extração de rodovias e intrinsecamente utilizada pelo operador humano. Elas também possuem, corriqueiramente, uma geometria fora dos padrões dos projetos de engenharia rodoviária. Conseqüentemente, outras feições presentes na área

rural, como aceiros, curvas de nível e vias sazonais, acabam por apresentar um comportamento (geométrico e radiométrico) muito semelhante ao das rodovias, conforme pode ser observado na Figura 30. Uma discussão complementar destas questões é feita na subseção 3.3.2, que explora as características das imagens *RapidEye* para a extração de feições lineares.

Figura 30. Áreas com aceiros, curvas de nível e vias sazonais no entorno das rodovias.



Assim, para que o operador humano consiga distinguir quais são as estradas de fato na cena disponível, seria necessária uma cuidadosa análise das conexões entre as feições candidatas e as rodovias próximas, exigindo um conhecimento prévio da área. Quando possível de ser realizada esta ação demandaria muito tempo e implicaria na necessidade de constantes e prolongadas verificações em campo. Já os algoritmos (semi-)automáticos de extração de rodovias, mesmo que adaptados para operarem com a resposta radiométrica do solo exposto, passariam a ter o inconveniente de resultar em uma exaustiva quantidade de falsos positivos, exigindo a intervenção do operador humano, que implicaria nas questões abordadas.

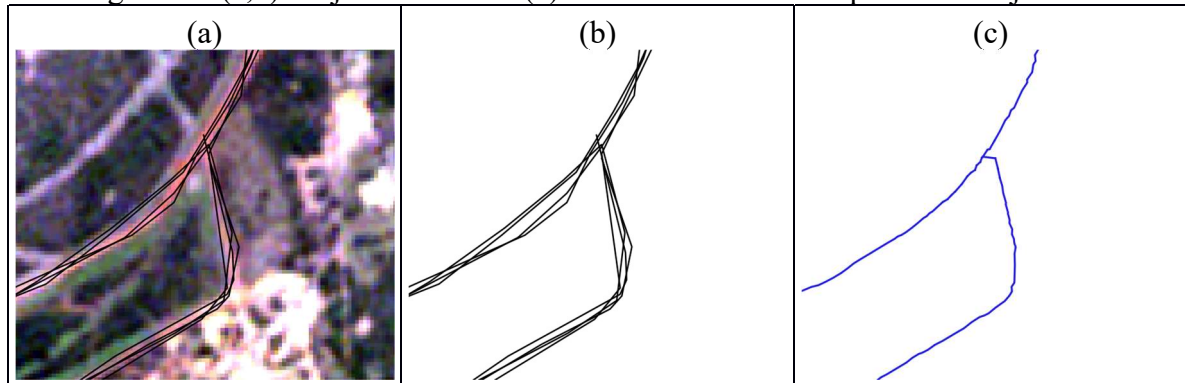
A alternativa aqui proposta para contornar essas dificuldades é a utilização de registros de trajetórias GPS para inferir os eixos das rodovias trafegáveis e a partir delas realizar a expansão da malha preexistente. Estas trilhas podem ser obtidas de diferentes formas, conforme tratado na subseção 2.1.2, incluindo ainda, de forma prática, as frotas estaduais de manutenção das estradas, a frota municipal de transporte escolar rural, a frota de transportadoras privadas de produtos agrícolas, etc. O processo de inferência desenvolvido para esta etapa do método apresenta relevante nível de complexidade e ineditismo, estando amplamente detalhado na subseção 3.3.1 e com resultados avaliados na subseção 4.1.1.

De forma sucinta, no processo proposto de inferência de mapas de rodovias os dados de entrada são as trajetórias GPS de uma BDT que serão processadas por meio de operações geométricas de maneira a obter o grafo de descrição dos eixos das trajetórias. Tais operações serão realizadas por operadores comumente utilizados na Análise Espacial e na Generalização



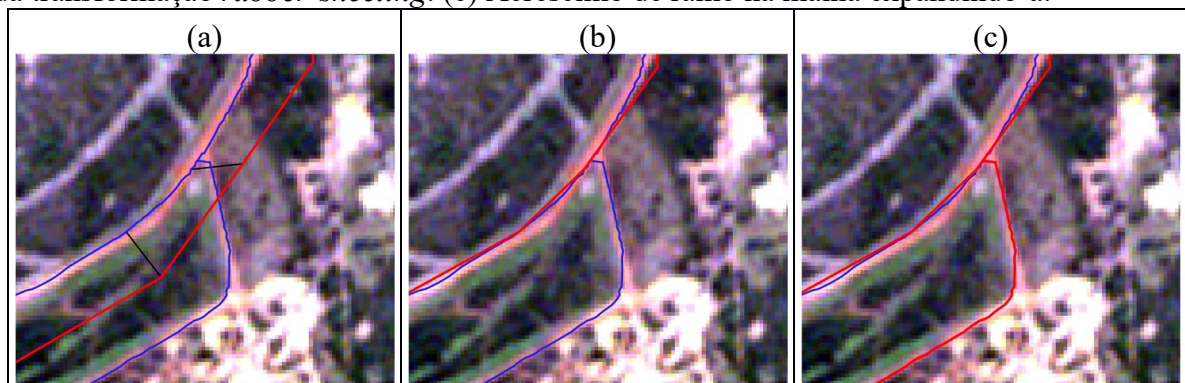
Cartográfica, como *buffer*, dissolução, simplificação, etc. O método pressupõe que havendo um número suficiente de trajetórias o conjunto tenderá a se estabilizar, delineando um contorno geométrico semelhante ao da própria rodovia em que o receptor se deslocava no momento da coleta, elevando a confiança de que o eixo deste contorno estará próximo ao eixo das próprias rodovias (Figura 31).

Figura 31. (a,b) Trajetórias GPS e (c) eixo médio inferido a partir das trajetórias.



Em seguida, os eixos inferidos são utilizados como referência (permanecerão fixos) em um processo de conflação vetor-para-vetor com a malha preexistente (se deslocará em direção aos eixos inferidos) via *rubber-sheeting*, realizada no software *ArcGIS* (LEE et al., 2014), alinhando-as (Figura 32a,b). Apesar de bastante raro, eventualmente pode ser necessário intervenção do operador para corrigir alguma relação equivocada estabelecida pelo *rubber-sheeting*. Com as malhas alinhadas e a topologia da malha de referência correta, os ramos extras são acrescidos a malha preexistente (Figura 32c), finalizando o processo de expansão.

Figura 32. (a) Correspondência definida entre a malha inferida e a pré-existente. (b) Resultado da transformação *rubber-sheeting*. (c) Acréscimo de ramo na malha expandindo-a.



Apesar de não haver garantias da qualidade geométrica alcançada pelos eixos inferidos, há uma integridade topológica extremamente relevante. Assim, garantida a topologia dos novos

ramos, o interesse da etapa seguinte é aumentar a acurácia geométrica da malha por meio de uma nova malha de referência acurada.

### 3.2.2 Ajuste da Malha Expandida

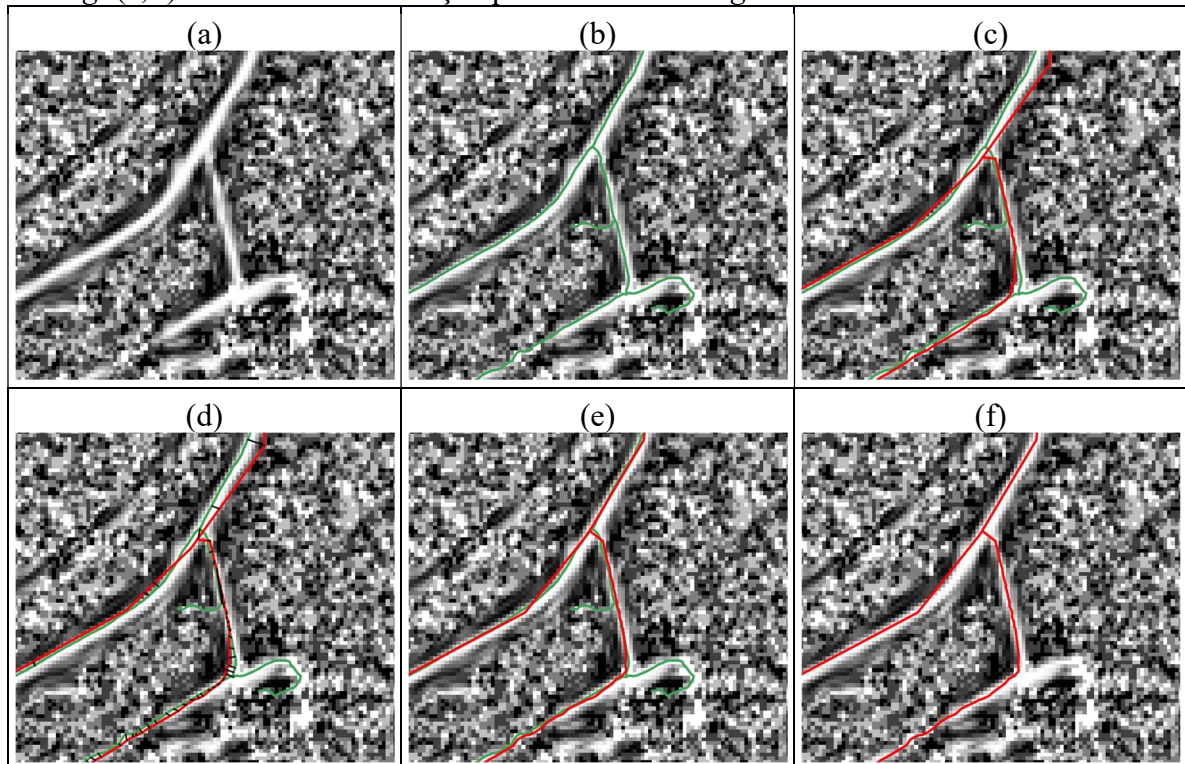
O processo realizado na etapa anterior acaba por aproximar o arquivo vetorial preexistente às rodovias descritas pelas trajetórias inferidas e tomadas como referência no processo de conflação. Porém, devido à natureza das trajetórias GPS que deram origem ao eixo de referência utilizado, não há garantias do quanto próximo estão da real posição das rodovias. Diante desta incerteza quanto a magnitude dos erros presentes na malha expandida é proposta nesta etapa um processamento intermediário para ajuste da malha. É relevante salientar que ao ignorar o ajuste proposto nesta etapa torna-se necessária a adoção de grandes espaços de busca para se obter os eixos das rodovias, inviabilizando o uso de contornos ativos paramétricos na solução.

Quanto aos dados disponíveis, o melhor referencial possível para o ajuste geométrico da malha expandida são os eixos das rodovias obtidos a partir das imagens *RapidEye*, cujo uso nas etapas iniciais implicaria nas limitações comentadas anteriormente. No entanto, considerando que nesta etapa a malha possui todos os ramos, apresenta integridade topológica e está consideravelmente mais próxima da sua posição ideal, algumas soluções podem ser propostas. Na subseção 3.3.2 é apresentado um conjunto robusto de processamentos sobre as imagens *RapidEye* que viabilizam a obtenção dos eixos das rodovias com completeza suficiente para esta etapa do método, conforme pode ser verificado nos experimentos avaliados na 4.1.2.

O processo de extração proposto inicia com uma operação aritmética de subtração entre as bandas *red edge* e verde, gerando uma imagem sintética que é um índice (*sub<sub>red edge</sub>*) especialmente eficiente em aumentar o contraste entre as rodovias e o restante da paisagem, suprimindo a resposta da vegetação, que é predominante na área rural. As *sub<sub>red edge</sub>* calculadas para os diferentes anos de cobertura disponíveis são então limiarizadas e somadas, formando uma única imagem sintética que explora a redundância da feição de interesse (Figura 33a). De posse da imagem sintética e utilizando o *Halcon* um filtro anisotrópico CED é aplicado e em seguida os eixos das rodovias são extraídos via detector de linhas de *Steger* (Figura 33b) em duas etapas, sendo a primeira configurada para às feições claras (alta resposta radiométrica, ou seja, solo exposto) e a segunda para às feições escuras (baixa resposta radiométrica, ou seja, asfalto), com a posterior integração dos resultados. Cada segmento extraído recebe um campo

de atributo contendo sua possível classe: “solo exposto” ou “asfalto”. Então, uma nova transformação *rubber-sheeting* é realizada, ajustando a malha expandida aos eixos extraídos e agora tomados como referência no processo de conflação (Figura 33c,d), garantido assim uma boa proximidade com as posições reais dos eixos das rodovias (Figura 33f), .

Figura 33. (a) Imagem sintética. (b) Malha de referência obtida por *Steger*. (c) Malha a ser ajustada e malha de referência. (d) Correspondência estabelecida entre as malhas por *rubber-sheeting*. (e, f) Resultado da conflação por *rubber-sheeting*.



É esperado que ao final desta etapa a malha preexistente, que foi expandida e agora ajustada, se encontre próximas das posições ideais das rodovias (Figura 33), viabilizando o uso de contorno ativo paramétrico no espaço-imagem na etapa seguinte.

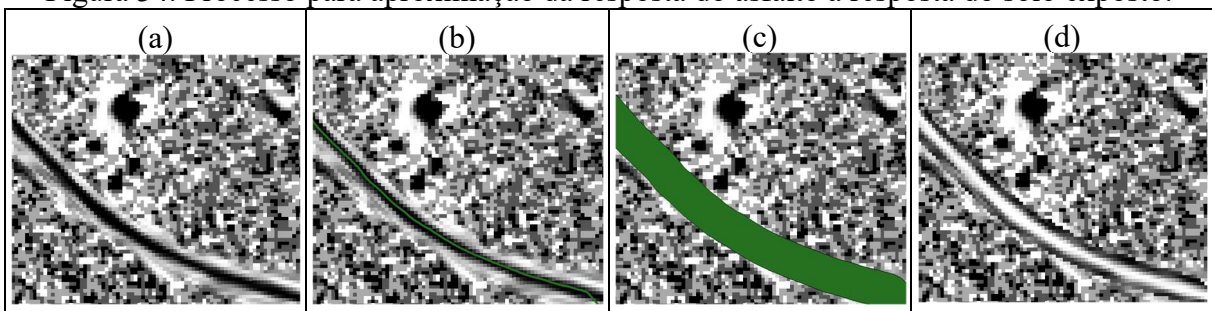
### 3.2.3 Refino da Malha Ajustada

Em razão das etapas de expansão e ajuste a malha encontra-se topologicamente íntegra e com seus ramos próximos às rodovias presentes na imagem. Estas características tornam esta malha uma entrada suficientemente robusta para viabilizar o processo de refino por contorno ativo paramétrico, em particular por *snakes* de redes, que manterá a integridade topológica.

Conforme abordado na apresentação dos conceitos dos contornos ativos paramétricos (subseção 2.3), as *snakes* podem ser configuradas para operar com feições de resposta clara ou

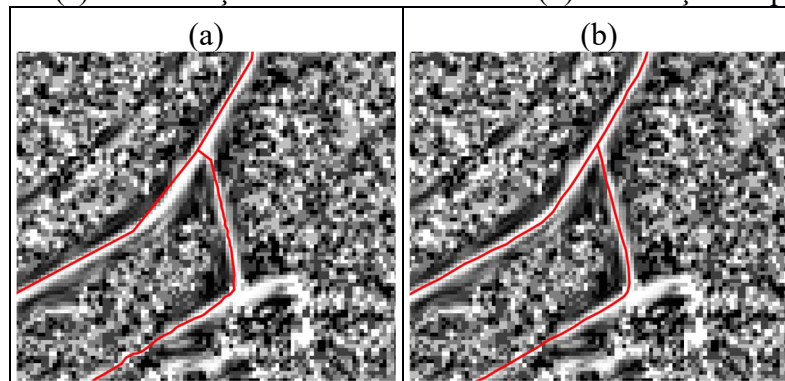
escura, mas não de modo simultâneo. Isto implica na necessidade de adequação da imagem sintética gerada na etapa anterior, garantindo que as feições de interesse tenham o mesmo padrão de resposta na imagem. Considerando que as rodovias asfaltadas (Figura 34a,b) apresentam os melhores resultados de completude na extração (conforme discutido na subseção 4.1.2), optou-se por levá-las para uma resposta semelhante ao do solo exposto, ou seja, tons mais próximos ao branco. Para isso, os segmentos da malha que possuem o atributo “asfalto” (advindo da etapa anterior), foram dilatados por meio de um *buffer* de 20 m ou 4 *pixels* (Figura 34c) e todos os *pixels* em contato com o polígono resultante tiveram seus valores invertidos em relação ao máximo e mínimo do grupo (Figura 34d), garantindo a aproximação das respostas das vias para o branco e a existência de bordas para guiar o desenvolvimento do contorno ativo paramétrico.

Figura 34. Processo para aproximação da resposta do asfalto a resposta do solo exposto.



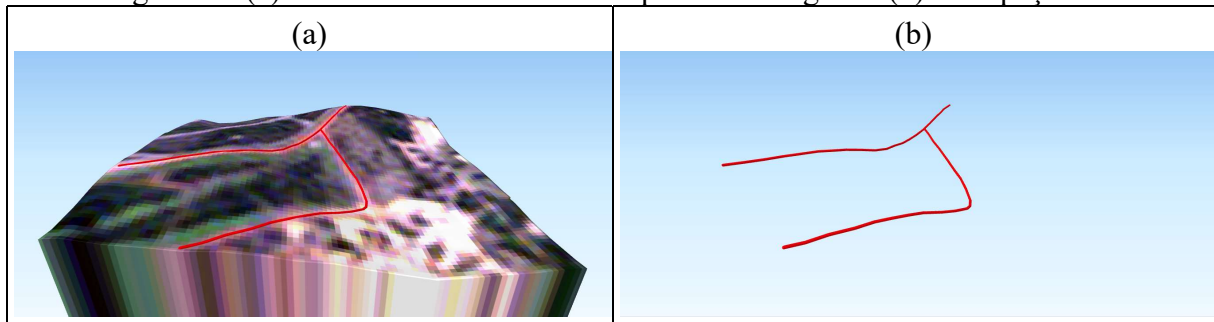
Com a imagem sintética adequada e a malha vetorial com topologia íntegra e suficientemente próxima às rodovias na imagem (Figura 35a), a aplicação das *snakes* de rede é realizada (Figura 35b). É recomendada a aplicação de um filtro de suavização antes de iniciar o processo, podendo ser o filtro anisotrópico.

Figura 35. (a) Inicialização das *snakes* de rede e (b) finalização do processo.



Por fim, a malha resultante (Figura 35b) é estendida ao espaço tridimensional por meio da inserção da coordenada  $Z$  no arquivo vetorial advinda do SRTM (Figura 36). A posição de um ponto na grade SRTM e consequentemente sua elevação é estabelecida pelos princípios abordados na subseção 2.1.

Figura 36. (a) Malha tridimensional sobreposta na imagem e (b) no espaço 3D.

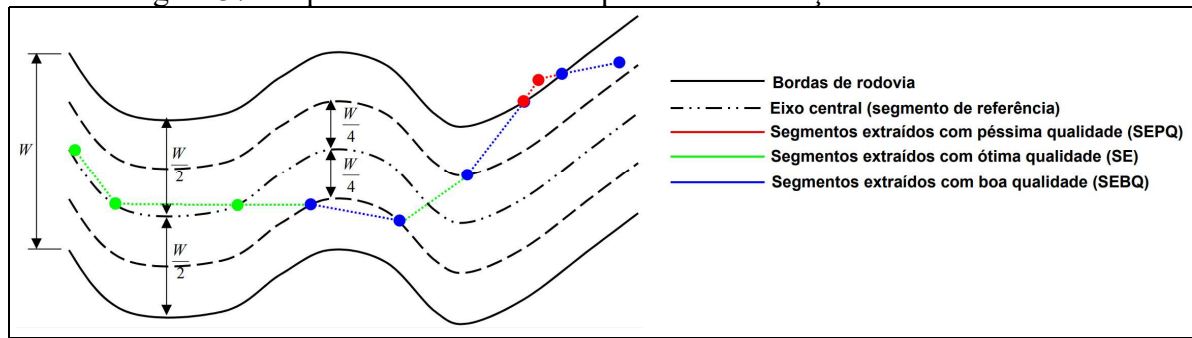


Assim, ao final do processo o arquivo vetorial estará expandido, topologicamente correto, geometricamente corrigido e com coordenadas tridimensionais. Além disso a estrutura de atributos estará preservada no padrão da INDE que o originou, permitindo o imediato reuso do dado.

#### 3.2.4 Avaliação dos Resultados

A avaliação dos resultados alcançados pelo método proposto se deu de forma qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa foi realizada por inspeção visual nos resultados intermediários e finais, procurando aspectos positivos e negativos do método. Também foi verificada a integridade dos atributos e da estrutura topológica do arquivo resultante, tendo como referência o arquivo de entrada e a INDE na qual ele foi elaborado. Já a análise quantitativa foi baseada nas discrepâncias planimétricas ( $d$ ) apuradas entre pontos amostrados na malha resultante e seus homólogos na malha de referência, que subsidiaram o cálculo dos indicadores de Desvio-Padrão, RMSE e PEC-PCD. É relevante destacar que a malha de referência foi obtida por minuciosa vetorização manual das rodovias a partir das imagens *RapidEye*. Por fim, foram apurados os índices de completeza, correção e qualidade com base em classificações que levam em consideração a largura ( $W$ ) da rodovia (Figura 37).

Figura 37. Esquema conceitual dos tipos de classificação do eixo extraído.



Fonte: Maia (2003).

Os três tipos de classificação que o eixo extraído pode receber são:

- Tipo 1 – Segmentos extraídos com ótima qualidade (SE): Segmento com discrepância menor ou igual ao limiar  $W/4$ .
- Tipo 2 – Segmentos extraídos com boa qualidade (SEBQ): Segmento com discrepância dentro do intervalo de  $]W/4, W/2]$ .
- Tipo 3 – Segmentos extraídos com péssima qualidade (SEPQ): Segmento com discrepância maior do que o limiar  $W/2$ .

Categorizados os diferentes tipos de segmentos, pode-se definir os parâmetros de qualidade conforme apresentados por Wiedemann e Hinz (1999):

- Completeza (COM):

$$COM = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i}{S} \quad (68)$$

- Correção (COR):

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^m SE_i}{\sum_{i=1}^m SE_i + \sum_{i=1}^k SEBQ_i} \quad (69)$$

- Qualidade (QUAL):

$$QUAL = \frac{COM \times COR}{COM - COM \times COR + COR} \quad (70)$$

Sendo  $S$  o comprimento da linha poligonal ou eixo de referência;  $m$  o número de segmentos extraídos com ótima qualidade;  $k$  o número de segmentos extraídos com boa qualidade.

### 3.3 Processos Complementares Propostos

Nesta seção serão apresentados dois processos que fazem parte do método proposto, porém são conceitualmente independentes e com características que garantem seu ineditismo. O primeiro processo (subseção 3.3.1) promove a inferência de mapas de rodovias a partir de trajetórias GPS explorando o formato vetorial. Já o segundo processo (subseção 3.3.2) propõe uma abordagem de extração de rodovias explorando aspectos da banda *red edge* das imagens *RapidEye*, fazendo uso da boa resolução temporal do Catálogo do MMA.

#### 3.3.1 Inferência do mapa de rodovias em trajetórias GPS

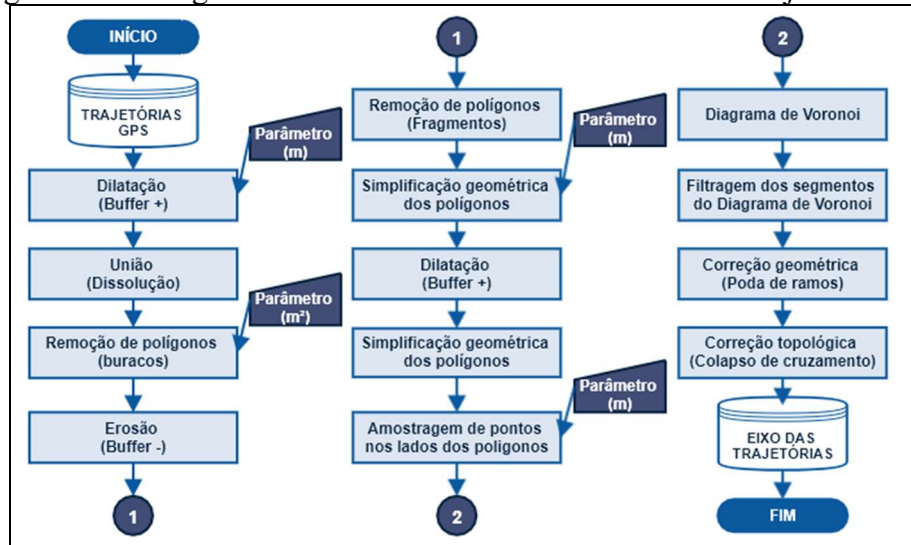
O objetivo do processo apresentado nesta subseção é fornecer uma malha de referência a partir da inferência do eixo das rodovias em trajetórias GPS para ser utilizada no processo de expansão da malha de rodovias, conforme descrito na subseção 3.2.1. O método aqui proposto opera integralmente no espaço-objeto e tem inspiração nos trabalhos de:

- Davies et al. (2006) que utilizou o Diagrama de Vonoroi para obter os eixos das rodovias a partir de uma estimativa de densidade de pontos de trajetórias;
- Chen e Cheng (2008) que inferiram os eixos das trajetórias a partir de operações morfológicas;
- Biagioni e Eriksson (2012) que propuseram uma série de pós-processamentos para correção da geometria e topologia do mapa de rodovias inferido.

Porém, diferentemente dos métodos citados, na presente proposta as trajetórias não são discretizadas em uma estrutura *raster* (espaço-imagem) mas processadas em sua forma vetorial de linhas poligonais (espaço-objeto), viabilizando a aplicação em grandes áreas com baixo consumo de recursos computacionais. São utilizados processos de agrupamentos de feições espaciais do tipo linhas poligonais e operações morfológicas bem estabelecidas na aérea. Possui ainda a característica de ser parcialmente incremental, pois caso haja interesse em acrescentar novas trajetórias não há a necessidade de reiniciar o processo do zero. Por fim, não é iterativo, realizando cada etapa em um único processamento para todas as trajetórias.

As etapas do processo proposto (Figura 38) serão apresentadas no transcórper do texto e os resultados alcançados serão ilustrados por meio de figuras com recortes centralizados em uma única região da BDT, com escala fixa, permitindo a visualização dos detalhes.

Figura 38. Fluxograma do método de inferência do eixo das trajetórias GPS.

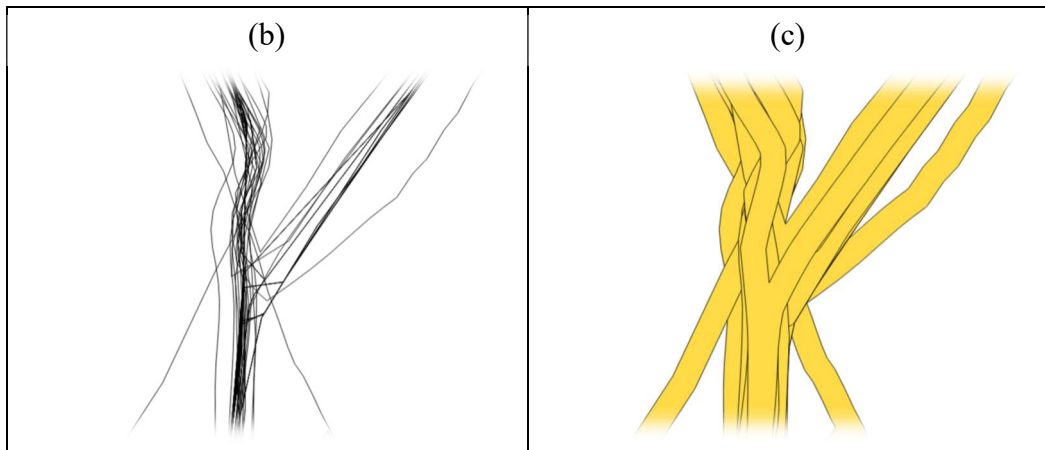


O processo inicia com o carregamento das trajetórias armazenadas em uma BDT que pode ser de origem pública (por exemplo, trajetórias geradas pela frota de veículos do Estado) ou privada (por exemplo, *OpenStreetMap*), em suas coordenadas originais do espaço-objeto (latitude e longitude), desprezando as altitudes (Figura 39a,b). Para cada linha poligonal deste conjunto é gerada um *buffer*. O *buffer* cria uma nova geometria, envolvendo todos os pontos cuja a distância em relação ao elemento original seja igual ou inferior a um determinado limiar. Neste caso, com limiares positivos será acrescida uma nova dimensão (largura) às linhas poligonais, transformando-as em faixas, semelhante a um processo morfológico de dilatação (Figura 39c).

Figura 39. (a) Trajetórias GPS de uma BDT com destaque (retângulo vermelho) para (b) uma região de cruzamento que será utilizada para ilustrar a evolução do método. (c) Faixas resultantes da operação de *buffer*.



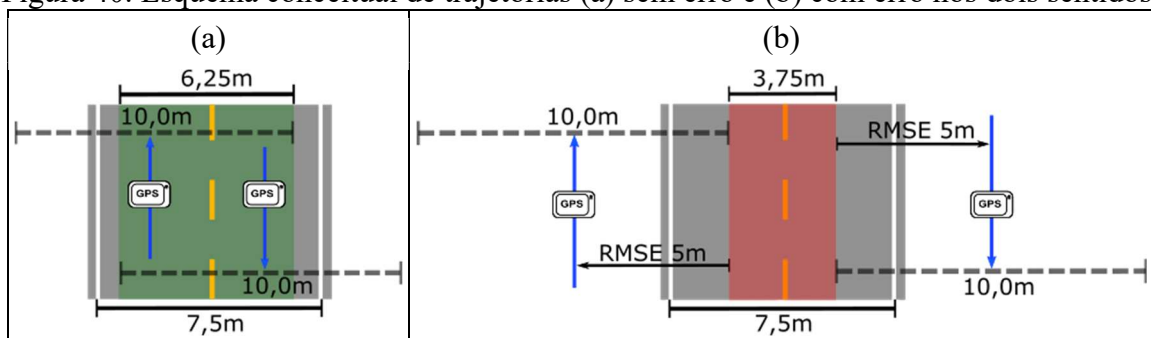




Devido à proximidade entre as linhas poligonais nas áreas de maior redundância de registro das trajetórias, as faixas resultantes apresentarão uma desejada sobreposição (Figura 39b), delineando em aspectos gerais um polígono com comportamento geométrico semelhante as rodovias. É recomendado considerar a densidade de trajetórias disponíveis para definir o limiar do *buffer*, pois poucas trajetórias vão exigir um limiar mais alto para o *buffer*, enquanto uma grande redundância vai permitir valores mais baixos.

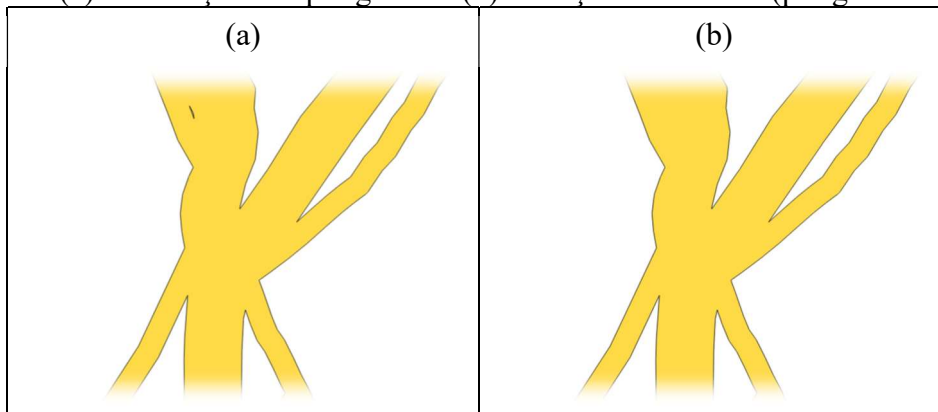
Tomando como base os valores apurados na subseção 3.1.4, um *buffer* com limiar de 5 m seria suficiente para compensar o RMSE médio de 5 m. Assim, considerando esse *buffer* de 5 m aplicado em duas trajetórias coletadas sem erros (situação hipotética) em uma rodovia de 7,5 m de largura (dimensão comum para as rodovias brasileiras), haveria uma sobreposição de 6,25 m (Figura 40a). No entanto, considerando o pior caso possível, se for aplicado um deslocamento nos dois receptores de 5 m (RMSE médio), haveria um distanciamento de 3,75 m entre as faixas (Figura 40b), impedindo a sobreposição e inviabilizando o método proposto. Logo, se for mantido o limiar de 5 m haverá a necessidade de garantir um mínimo de três trajetórias para alcançar resultados satisfatórios.

Figura 40. Esquema conceitual de trajetórias (a) sem erro e (b) com erro nos dois sentidos.



Com as trajetórias dilatadas, em seguida é realizada uma dissolução das faixas originadas pelo *buffer*. No processo de dissolução, as fronteiras entre as faixas sobrepostas são dissolvidas, eliminando a duplicidade de áreas e transformando diferentes elementos em um único elemento, que neste caso será um grande polígono com vários polígonos menores (buracos) em seu interior (Figura 41a). Esses buracos podem corresponder às áreas no terreno entre as rodovias (grandes dimensões); áreas formadas por trajetórias *outliers* (média dimensão); ou ainda áreas de não sobreposição entre as trajetórias próximas (pequena dimensão). É necessário a eliminação dos polígonos deste último caso, garantindo uma homogeneidade na região interna do polígono que descreve as vias. Assim, é realizada uma remoção dos polígonos cuja área seja igual ou inferior a um determinado limiar (Figura 41b).

Figura 41. (a) Dissolução dos polígonos e (b) remoção de buracos (polígonos internos).

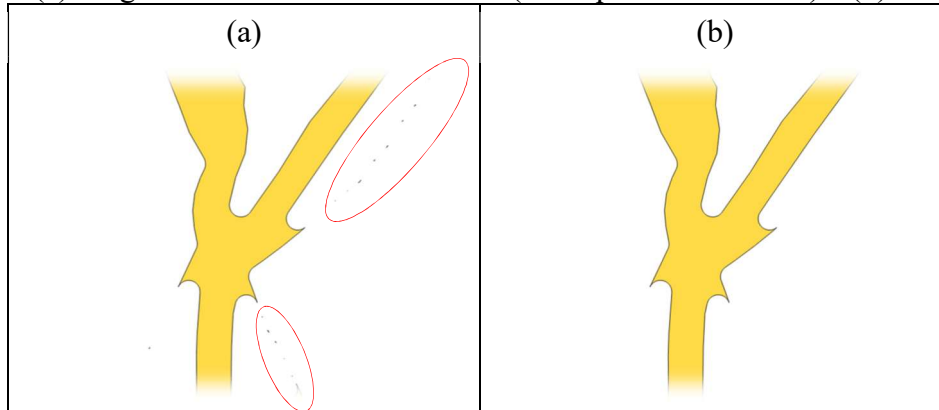


Neste trabalho, para a definição do limiar de área levou-se em consideração que independente do cenário (urbano ou rural), os polígonos candidatos a remoção estão em maior quantidade e apresentam os menores valores de área. Assim, utilizando um histograma das áreas dos polígonos foi definido um limiar de 400 m<sup>2</sup>, que foi adotado nos experimentos da subseção 4.1.1.

Com os menores polígonos internos (buracos) removidos faz-se necessário eliminar as faixas que ainda se encontram isoladas (resultado da não sobreposição) e que por consequência delimitam áreas indesejadas nas vizinhanças do contorno principal (Figura 41b). Para isso é realizado um novo processo de *buffer* com limiar negativo e de valor absoluto superior ao utilizado na dilatação (neste caso -5,10 m, por exemplo). O resultado desta operação geométrica é semelhante ao alcançado pela operação morfológica de erosão, reduzindo a largura do polígono a ponto de provocar o colapso dessas faixas isoladas gerando fragmentos (pequenos polígonos isolados), conforme pode ser observado no destaque em vermelho na Figura 42a.

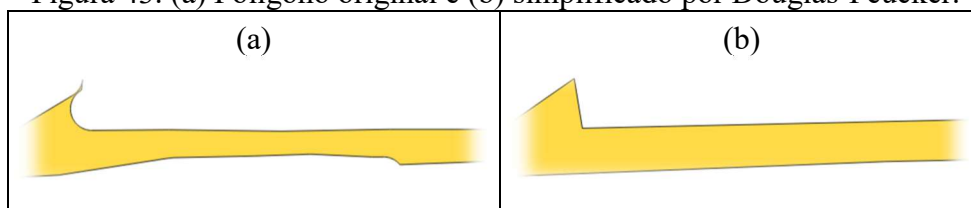
Para eliminar estes fragmentos uma nova remoção de polígonos é aplicada com os mesmos parâmetros da remoção anterior (Figura 42b).

Figura 42. (a) Fragmentos resultantes da erosão (destaque em vermelho) e (b) sua remoção.



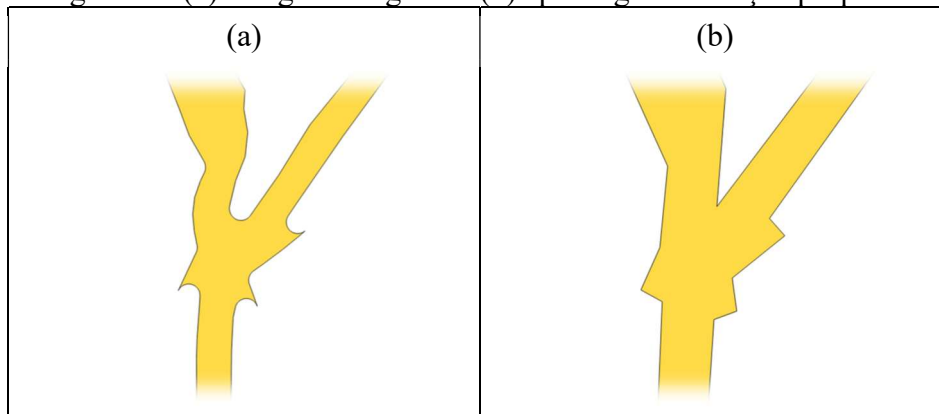
Procurando recuperar as desejadas características de paralelismo e homogeneidade entre as bordas das rodovias (que aqui são aproximadamente representadas pelas bordas do polígono delineado), é proposta uma generalização geométrica. Para isto, inicialmente é realizada uma simplificação utilizando o algoritmo de Douglas-Peucker (VISVALINGAM e WHYATT, 1990), que exige o fornecimento de um parâmetro correspondente à distância máxima não tolerada entre um vértice e o segmento formado pelos vértices anterior e posterior a ele. Vértices com distância igual ou inferior ao parâmetro são removidos pelo algoritmo, promovendo uma simplificação do contorno do polígono principal (Figura 43). Neste trabalho o valor do parâmetro foi fixado empiricamente em 5 m, tomando como base o valor do *buffer* inicial.

Figura 43. (a) Polígono original e (b) simplificado por Douglas-Peucker.



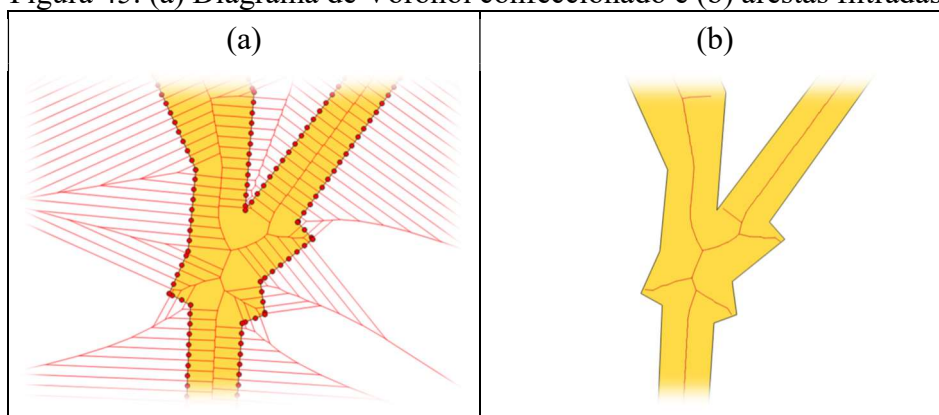
Em seguida, ainda como parte da generalização proposta, é aplicado um novo *buffer* com limiar positivo e uma nova simplificação, mantendo os parâmetros definidos anteriormente. O resultado dessa sequência de processamentos (Figura 44) é o aumento na regularidade do contorno do polígono, beneficiando os trechos abruptamente estreitos e reduzindo os serrilhados e quinas. Uma outra consequência bastante importante deste processo é a otimização dos recursos computacionais, com o tamanho dos arquivos reduzidos em média para menos de 6% do seu tamanho original.

Figura 44. (a) Polígono original e (b) após a generalização proposta.



Na próxima etapa do método deseja-se obter o Diagrama de Voronoi a partir de pontos do contorno do polígono. No entanto, como na etapa de generalização o número de vértices foi reduzido consideravelmente e não há naturalmente um espaçamento regular entre eles, faz-se necessário produzir uma camada densa de pontos regularmente espaçados ao longo do contorno do polígono para ser utilizada na construção do Diagrama de Voronoi. O parâmetro de amostragem desses pontos influirá diretamente no contorno do eixo derivado das arestas do Diagrama de Voronoi. Valores muito grandes darão ao eixo um aspecto serrilhado, enquanto baixos valores produzirão ao final do método eixos mais suaves. Neste trabalho foi utilizado um parâmetro de amostragem de 5 m, considerando que os eixos obtidos ao final desta inferência serão utilizados em processamentos com imagens *Rapdieye* cuja resolução é de 5 m. Com o Diagrama de Voronoi criado (Figura 45a) uma filtragem geométrica é aplicada de maneira a deixar somente as arestas cujos vértices estejam dentro da área do polígono, obtendo os segmentos que descrevem os eixos das trajetórias (Figura 45b).

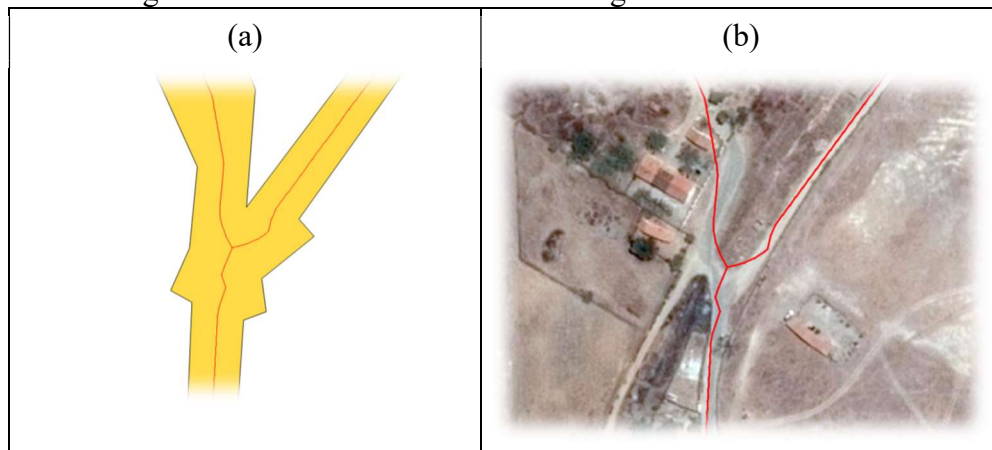
Figura 45. (a) Diagrama de Voronoi confeccionado e (b) arestas filtradas.



Este eixo terá inconsistências geométricas e topológicas a serem corrigidas (Figura 45b), conforme detalhadas por Biagioni e Eriksson (2012). A filtragem geométrica consiste na poda

de ramos indesejados, realizada por comprimento mínimo de segmento, e na remoção de triângulos (faces completas do Diagrama de Voronoi), que foi executada por critérios de área mínima de polígonos. Nos dois casos os parâmetros são bastantes tolerantes, pois esses erros geométricos se diferem muito do restante da geometria. Já a filtragem topológica em questão envolve a remoção de pontos duplicados de cruzamentos (ocorre somente em cruzamentos com quatro ou mais conexões), que foram colapsados em seu ponto médio por critérios de distância mínima entre cruzamentos de duas conexões. Os parâmetros para esse colapso dos pontos de cruzamento (ou união dos pontos de intersecção) são bastante simples e tolerantes podendo ser estabelecidos empiricamente. Por fim, estará inferido o eixo das rodovias (Figura 46a) por meio do eixo do polígono principal gerado ao longo do método, que corresponderá de forma aproximada ao eixo da própria rodovia na qual as trajetórias GPS foram coletadas (Figura 46b).

Figura 46. (a) Inconsistências geométricas e topológicas e sua (b) correção. (c) Eixo inferido e sobreposto em imagem da base de dados Microsoft Bing.



Esta malha resultante deve ser inspecionada pelo operador humano para verificação da integridade topológica, principalmente nas regiões de cruzamento, tendo em vista que não é desejável descontinuidades ao longo das vias ou em regiões de cruzamento, e a presença dessas anomalias pode prejudicar o resultado do processo de confluência. Na subseção 4.1.1 são apresentados um conjunto de experimentos para avaliação do processo aqui proposto.

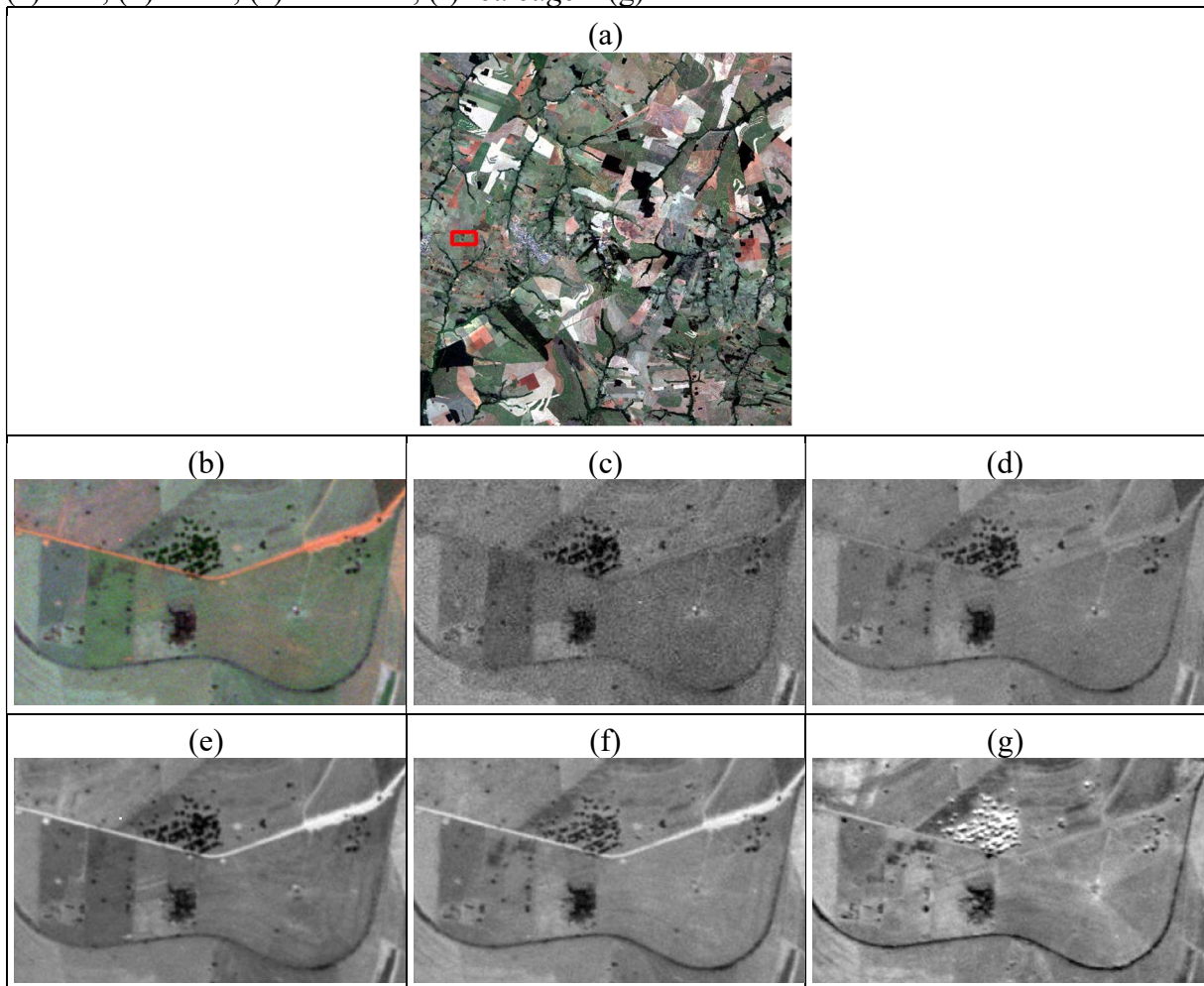
### 3.3.2 Extração do eixo das rodovias em imagens *RapidEye*

O objetivo do processo apresentado nesta subseção é fornecer uma malha de referência pela extração do eixo das rodovias a partir de imagens *RapidEye* para subsidiar o processo de confluência V2V previsto na subseção 3.2.2. Assim, nesta subseção é apresentado um processo

de extração de rodovias em cenário rural utilizando imagens *RapidEye 3A* processadas por operações algébricas, limiarização, suavização anisotrópica coerente (*coherence enhancing anisotropic diffusion*) e o extrator de linhas de *Steger*.

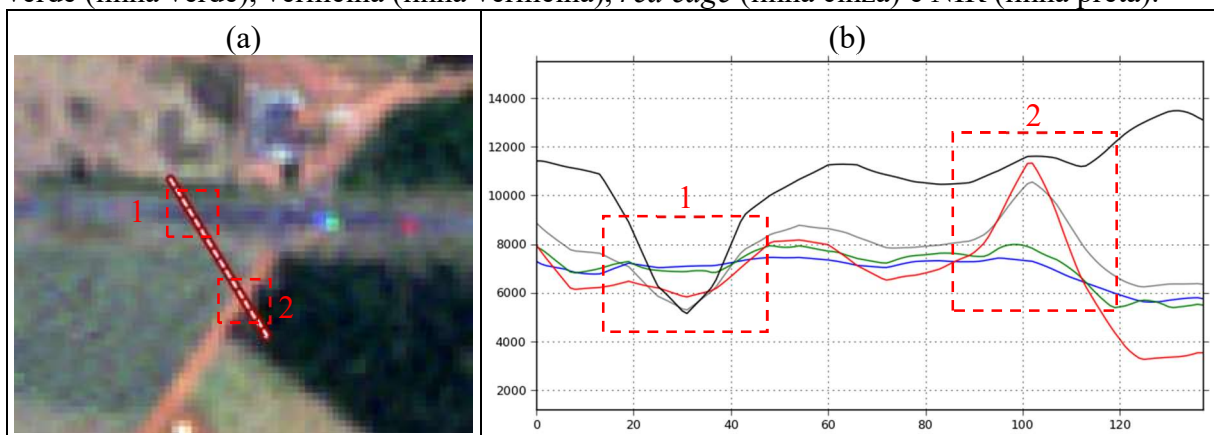
O cenário típico das rodovias rurais consiste em grandes áreas de vegetação (culturas, florestas, pastos, etc) com regiões urbanas interligadas por rodovias. Estas rodovias podem ser asfaltadas ou, como é mais comum nos países em desenvolvimento, de solo exposto. Por suas características de reflectância as coberturas das vias irão apresentar respostas distintas nas diferentes bandas que compõem as imagens multiespectrais, conforme pode ser observado no recorte de uma imagem *RapidEye* apresentado na Figura 47 que demonstra a variação de intensidade das rodovias de solo exposto e asfalto, em suas cinco bandas.

Figura 47. (a) Quadro completo da imagem *RapidEye* em composição RGB com destaque em vermelho para o (b) recorte com rodovias de solo exposto e asfalto e suas respostas nas bandas (c) azul, (d) verde, (e) vermelho, (f) *red edge* e (g) NIR.



Para verificar as intensidades de reflectância das rodovias nas diferentes bandas em uma escala numérica foi traçado um perfil transversal (Figura 48a) a uma rodovia asfaltada (quadrado 1) e outra de solo exposto (quadrado 2), gerando o gráfico da Figura 48b. Observando as bandas individuais ou o gráfico das respostas espectrais, é possível verificar a alta intensidade do solo exposto na banda 3 (vermelho), Figura 47e, e a baixa intensidade do asfalto na banda 5 (NIR), Figura 47g. Nota-se ainda, que tais feições apresentam respostas conjuntas na banda 4 (*red edge*), apesar de menos intensa se comparada com as bandas citadas (Figura 47f).

Figura 48. (a) Perfil das rodovias e (b) suas respectivas respostas nas bandas: azul (linha azul), verde (linha verde), vermelha (linha vermelha), *red edge* (linha cinza) e NIR (linha preta).



Assim, pode-se optar no processo de extração das rodovias por operar com a banda que apresenta a resposta mais acentuada para a feição de interesse (asfalto ou solo exposto). No entanto, isto implicaria em abrir mão de uma das feições ou em armazenar e processar duas bandas por cena, aumentando consideravelmente o espaço em disco e os esforços de processamento necessários para grandes extensões. Esta decisão dificultaria ainda a interpretação do comportamento das rodovias como uma malha unificada, aumentando as chances de ocorrerem descontinuidades, duplicações, omissões, etc.

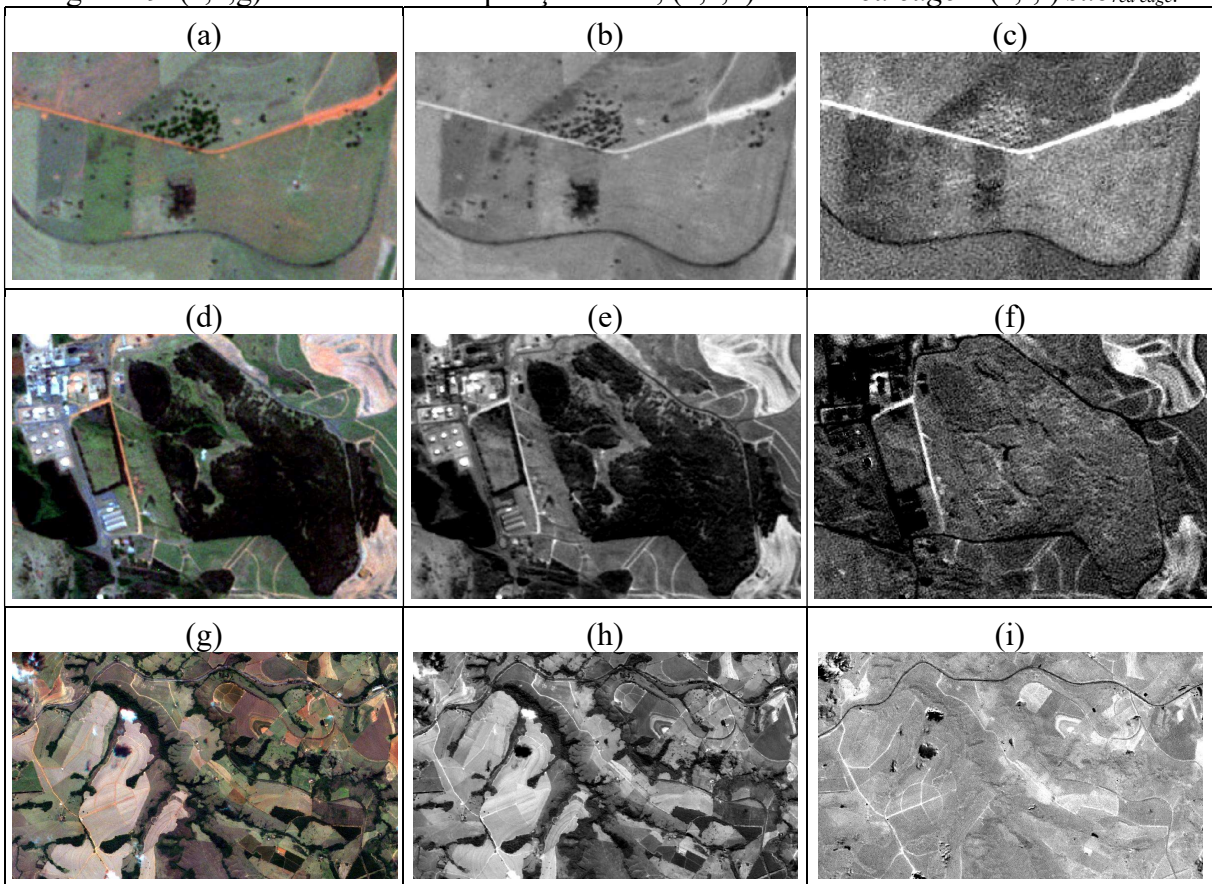
Este contexto faz a banda *red edge* tornar-se uma interessante opção. Porém, por registrar a reflectância entre a faixa do vermelho e do infravermelho a banda *red edge* apresenta uma leve redução nas intensidades das rodovias. Além disso, esta faixa do espectro eletromagnético é bastante sensível às diferentes respostas da vegetação, fazendo com que no cenário rural haja um grande número de detalhes registrados, tornando a cena bastante complexa para a extração de feições lineares em grandes extensões.

Uma maneira de reduzir esta complexidade da cena é aplicar uma operação aritmética entre as bandas, conforme proposto:

$$sub_{red\ edge} = Red\ Edge - Green \quad (71)$$

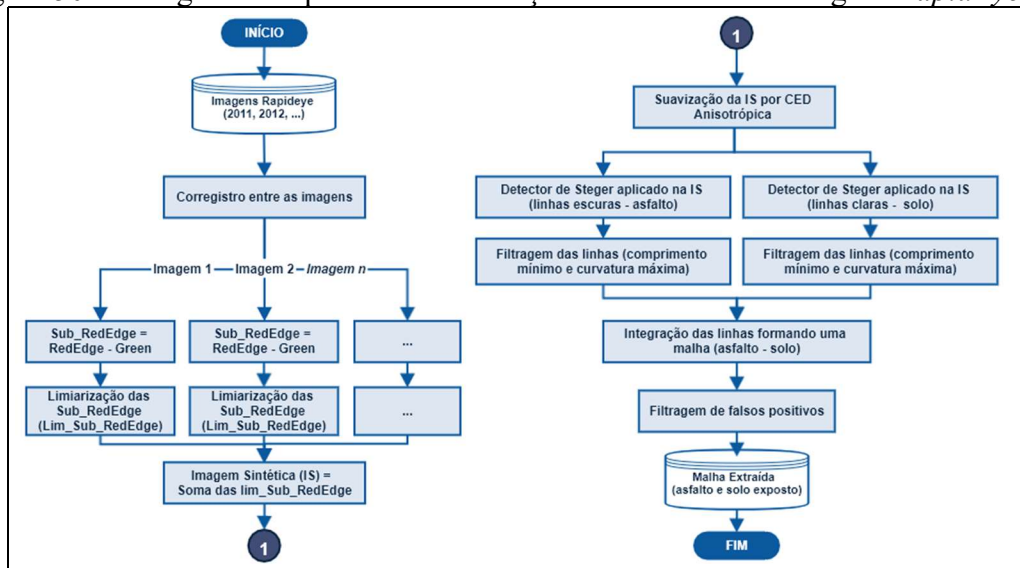
A remoção da resposta da faixa do verde dos valores do *red edge* promove uma supressão da vegetação simplificando a cena, conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 49c,f,i. Um efeito colateral previsto desta operação aritmética é a granulação da cena provocada pela redução da relação sinal-ruído. O cálculo da *sub<sub>red edge</sub>* se assemelha as operações envolvidas na criação de índices espectrais.

Figura 49. (a,d,g) Recortes da composição RGB, (b,e,h) banda *red edge* e (c,f,i) *sub<sub>red edge</sub>*.

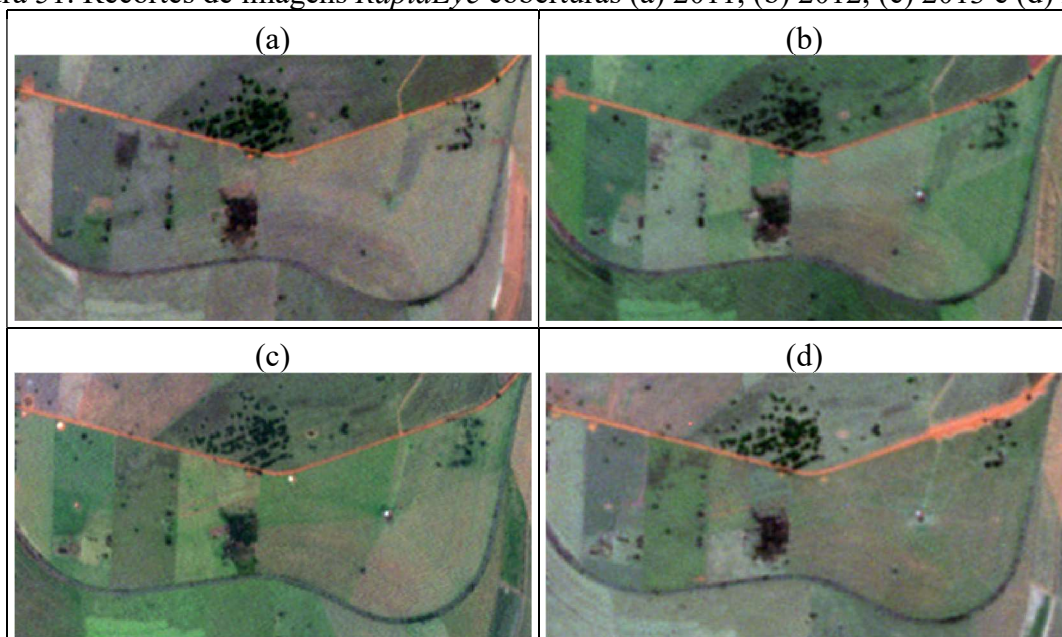


Definida a origem e motivação de uso da *sub<sub>red edge</sub>*, a seguir são descritas as etapas do processo proposto para a extração de rodovias em imagens *RapidEye 3A* (Figura 50).



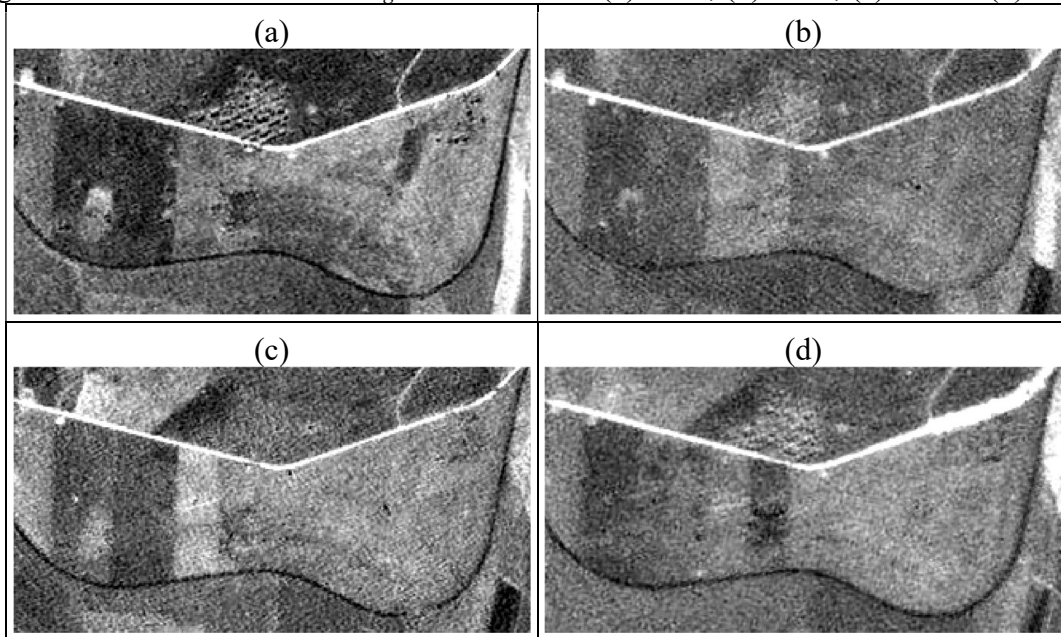
Figura 50. Fluxograma do processo de extração de rodovias em imagens *RapidEye 3A*.

O processo inicia com o registro entre as imagens disponíveis para a cena de interesse (normalmente de 3 a 5 coberturas), evitando nas etapas seguintes os sinais espúrios resultantes de pixels desalinhados (CANTY, 2014). De maneira prática, é recomendado definir como referência uma cobertura com data de coleta intermediária no conjunto, pois datas muito distantes dificultarão a definição dos pontos homólogos em razão da mudança natural da paisagem, como pode ser observado na Figura 51. Conforme apresentado na subseção 3.1.1 a cobertura 2011 apresenta um grande deslocamento em relação as demais, exigindo um maior número de pontos homólogos caso seja utilizada.

Figura 51. Recortes de imagens *RapidEye* coberturas (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014.

Com o registro realizado, em seguida é calculado o  $sub_{red\ edge}$  para cada cobertura (Figura 52). É esperado que alguns trechos das rodovias estejam degradados. Isto pode ocorrer por diversas razões, como a obstrução pela vegetação, mudança da resposta espectral devido a umidade, baixo contraste com regiões da vizinhança, etc.

Figura 52. Resultado do  $sub_{red\ edge}$  nas coberturas (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014.



Como as imagens disponibilizadas pelo MMA foram coletadas em diferentes épocas do ano, com grande intervalo temporal entre as coletas (aproximadamente 1 ano), há uma natural e já comentada mudança na paisagem devido a sazonalidade, fazendo com que alguns fatores que provocaram a degradação das vias em uma cena não estejam mais presentes na cena seguinte. Isto também ocorre com feições que provocam falsos positivos, como estradas sazonais, contornos de curvas de nível, aceiros, etc.

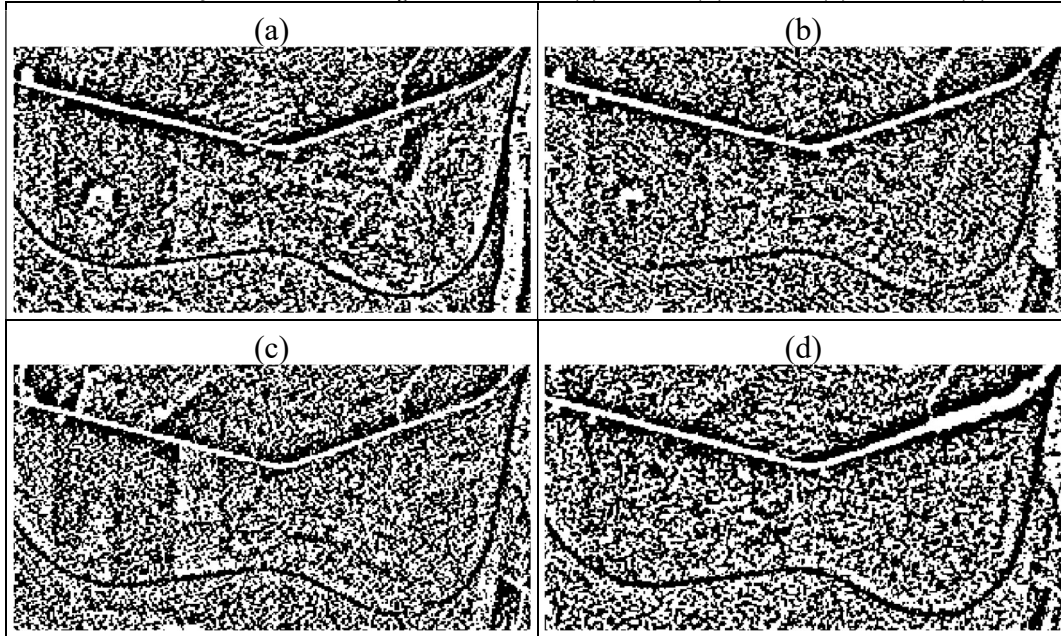
Uma forma intuitiva de explorar este aspecto temporal é combinar as imagens  $sub_{red\ edge}$  de diferentes datas. Para isso, inicialmente as imagens  $sub_{red\ edge}$  são limiarizadas por meio de um limiar adaptativo (Figura 53), também conhecido como limiar local ou dinâmico, definido por (BRADSKI, 2000; PEDRINI e SCHWARTZ, 2008):

$$I_{lim}(x, y) = \begin{cases} 1: I(x, y) > L(x, y) \\ 0: \text{caso contrário} \end{cases} \quad (72)$$

onde, a função  $L(x, y)$  indica um limiar para cada pixel da imagem de origem ( $I$ ), resultando na imagem limiarizada ( $I_{lim}$ ). O valor da função de limiarização  $L(x, y)$  é representado por uma

soma ponderada (correlação cruzada com uma janela Gaussiana) da vizinhança de tamanho  $N \times N$  centralizada na posição  $(x,y)$ . O valor do desvio-padrão da janela Gaussiana é definido automaticamente conforme o tamanho especificado da vizinhança.

Figura 53. Limiarização das  $sub_{red\ edge}$  coberturas (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2014.

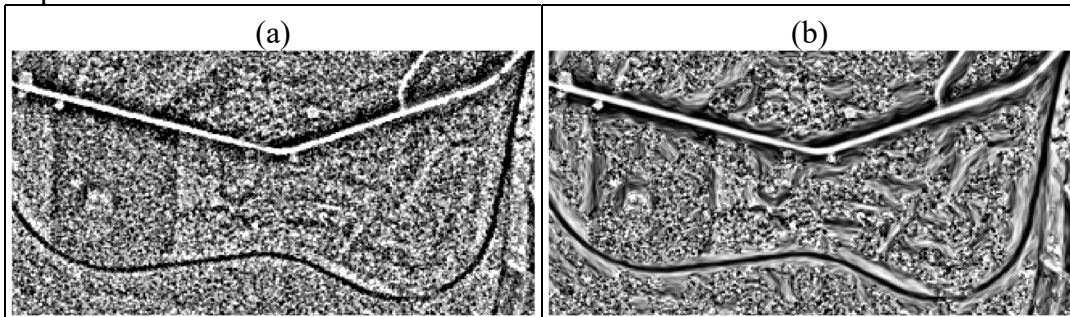


As imagens  $sub_{red\ edge}$  limiarizadas,  $Lim\_sub_{red\ edge}$ , são então somadas:

$$IS = \sum_{i=1}^n Lim\_sub_{red\ edge}, \quad (73)$$

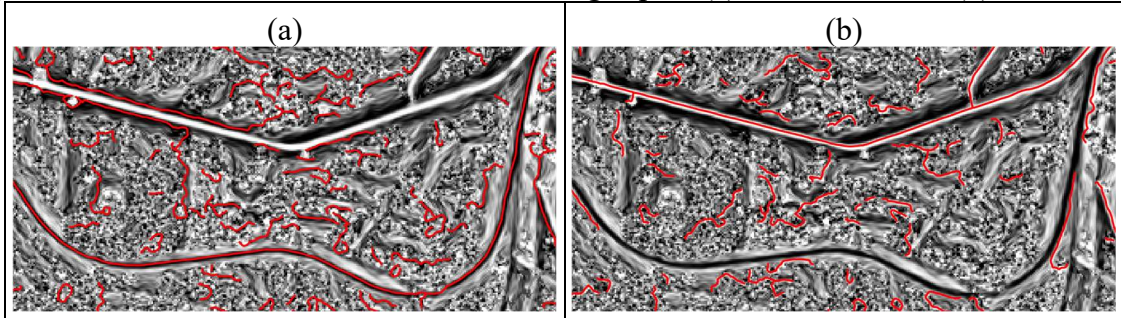
para formar uma nova imagem sintética ( $IS$ ) com maior homogeneidade no interior das regiões e bordas mais proeminentes nas rodovias (Figura 54a), resultando em uma severa redução nos falsos positivos no momento da extração. Então, para contornar a granulação das bordas provocadas pela operação algébrica que deu origem à  $sub_{red\ edge}$  e reforçar as estruturas lineares na imagem, foi aplicado um filtro anisotrópico CED (Figura 54b).

Figura 54. (a) Imagem sintética criada a partir das  $sub_{red\ edge}$  e (b) suavizada por um filtro anisotrópico CED.



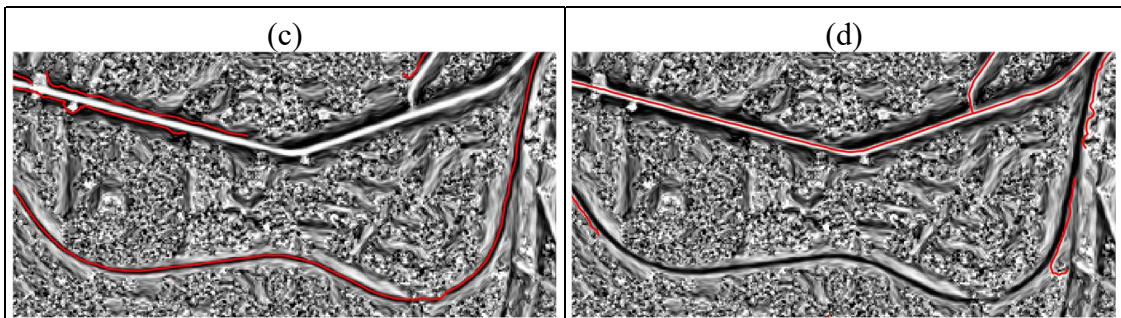
Com a imagem sintética suavizada é aplicado o detector de linhas de Steger em duas extrações. A primeira extração é realizada com o detector configurado para linhas escuras (obtendo o eixo das rodovias asfaltadas, Figura 55a) e em seguida para linhas claras (obtendo o eixo das rodovias de solo exposto, Figura 55b), sendo rotulado cada segmento resultante com a característica que o originou (asfalto ou solo exposto).

Figura 55. Resultado do detector de linhas de Steger para (a) linhas escuras e (b) linhas claras.



Pela composição da imagem sintética é esperado que os resultados das extrações apresentem um número elevado de ruídos (segmentos com comportamento geométrico caótico), porém um número reduzido de falsos positivos (segmentos com comportamento geométrico semelhante ao das rodovias). Para eliminar os ruídos da extração, que são segmentos fragmentados e bastante irregulares (Figura 55), é aplicada uma filtragem geométrica por critérios de comprimento mínimo e curvatura máxima (Figura 56b).

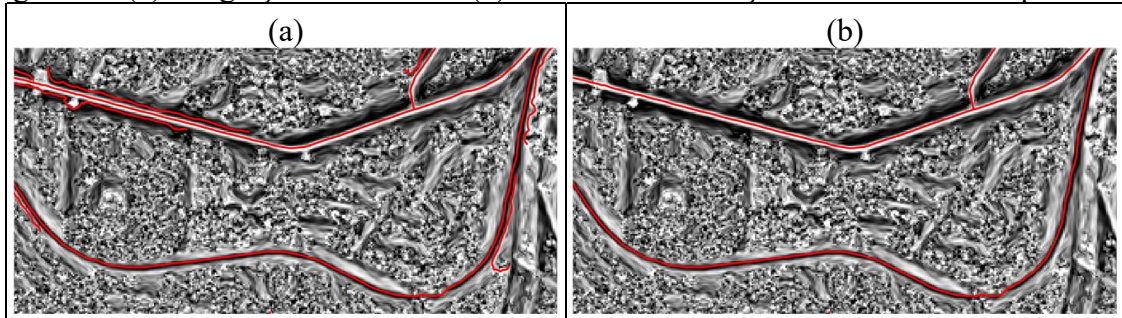
Figura 56. Resultados da filtragem de falsos positivos das detecções para (a) linhas escuras e (b) linhas claras.



Após a filtragem dos ruídos os dois conjuntos de segmentos extraídos são integrados em uma única malha (Figura 57a), mantendo para cada segmento os atributos individuais que os identificam como asfalto ou solo exposto. Considerando que a imagem sintética oferece uma boa referência para identificação de falsos positivos e que não é esperado um número elevado destas anomalias, é proposto uma remoção por filtragem manual, realizada por operador

humano (Figura 57b). Esta remoção tem por objetivo garantir que não haja falsos positivos próximos aos eixos das rodovias que possam prejudicar o processo de confluência previsto na subseção 3.2.2.

Figura 57. (a) Integração das linhas e (b) resultado da remoção manual de falsos positivos.



Por fim, têm-se os eixos das rodovias extraídos, porém sem garantias da integridade topológica nos cruzamentos. Na subseção 4.1.2 é realizado um conjunto de experimentos para validar os resultados do processo aqui proposto.

## 4 EXPERIMENTOS

Nesta seção são apresentados experimentos com respectivos resultados e discussões, procurando avaliar tanto os processos complementares propostos, com os resultados apresentados na subseção 4.1, quanto o próprio método proposto, cujos resultados são apresentados na subseção 4.2.

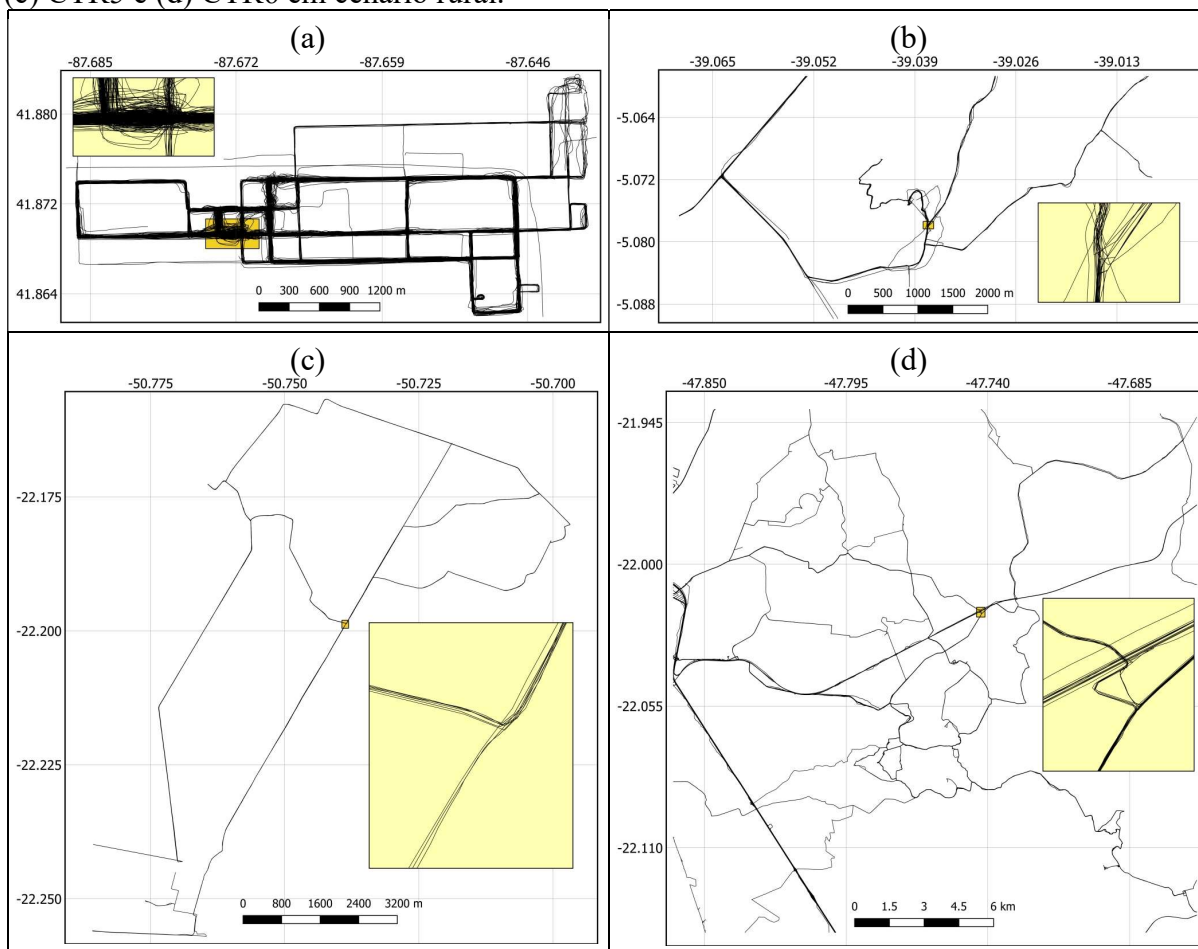
### 4.1 Experimentos dos Processos Complementares Propostos

Nesta subseção serão apresentados os experimentos realizados para avaliar o desempenho dos processos de inferência do eixo de malhas de rodovias proposto na subseção 3.3.1 e a extração de feições em imagens *RapidEye* descrito na subseção 3.3.2.

#### 4.1.1 Experimentos de inferência do mapa de rodovias em trajetórias GPS

Para avaliação do método proposto na subseção 3.3.1 foram utilizados seis conjuntos de trajetórias de rodovias (CTR) obtidas por GPS, dos quais os quatro mais relevantes são apresentados na Figura 58. O primeiro conjunto, CTR1 (Figura 58a), é uma BDT de referência coletada em cenário urbano por receptores GPS fixados em ônibus universitários e disponibilizada à comunidade científica pela Universidade de Ilinóis em Chicago (UIC, *University of Illinois at Chicago*) no endereço <https://www.cs.uic.edu/bin/view/Bits/Software>. Apesar do método proposto ser focado em área rural, o uso de uma BDT de referência ajuda a avaliar o potencial do método, por isso ela será utilizada nos experimentos desta subseção. Já o terceiro conjunto, CTR5 (Figura 58c), corresponde às trajetórias coletadas em campo com equipamentos GPS de baixo custo, conforme descrito na subseção 3.1.4. As trajetórias que compõem os demais conjuntos CTR2 (Figura 58b), CTR3, CTR4 e CTR6 (Figura 58d) foram obtidas da BDT do projeto *Openstreetmap* por meio da iniciativa de distribuição de seus dados brutos pelo endereço <https://www.geofabrik.de>. É relevante destacar, que pelas características de coleta, as trajetórias dos conjuntos CTR1 e CTR3 possuem aspectos de coleta CGI, enquanto os demais conjuntos por serem dados brutos do projeto *OpenStreetmap* são VGI.

Figura 58. Trajetórias para experimentos do método: (a) CTR1 em cenário urbano e (b) CTR2, (c) CTR5 e (d) CTR6 em cenário rural.



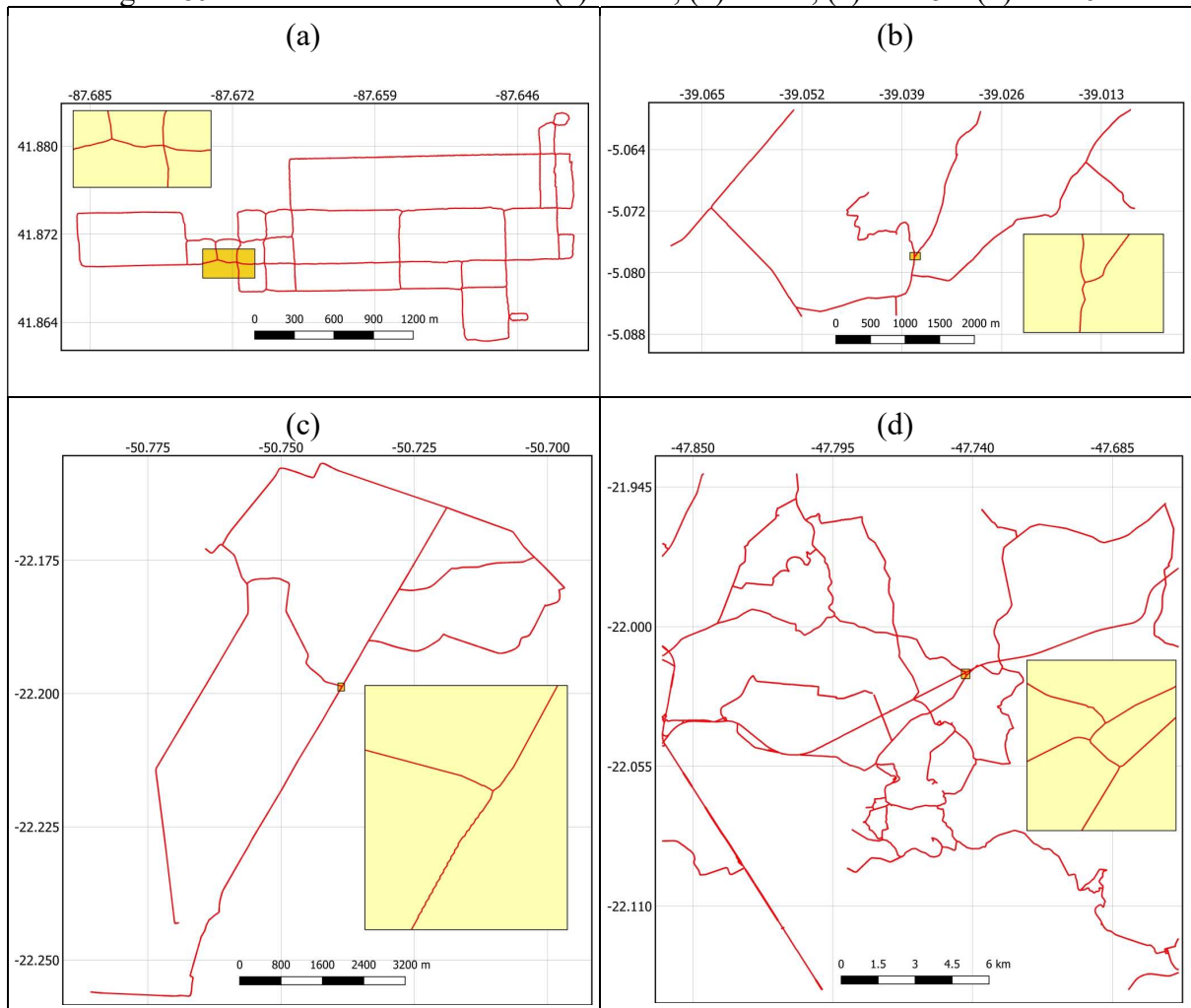
Nos experimentos foram utilizados os mesmos parâmetros para o processamento de todos os conjuntos de trajetórias, permanecendo os valores sugeridos na descrição do método e sumarizados na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros utilizados nos experimentos do processo proposto.

Dilatação (m)	Remoção de polígonos (m <sup>2</sup> )	Erosão (m)	Simplificação geométrica (m)	Amostragem de pontos no polígono (m)
5	400	5,10	5	5

Os resultados podem ser visualizados na Figura 59 e serão discutidos a seguir com base em análise qualitativa e quantitativa.

Figura 59. Resultado do método em (a) CTR1, (b) CTR2, (c) CTR5 e (d) CTR6.



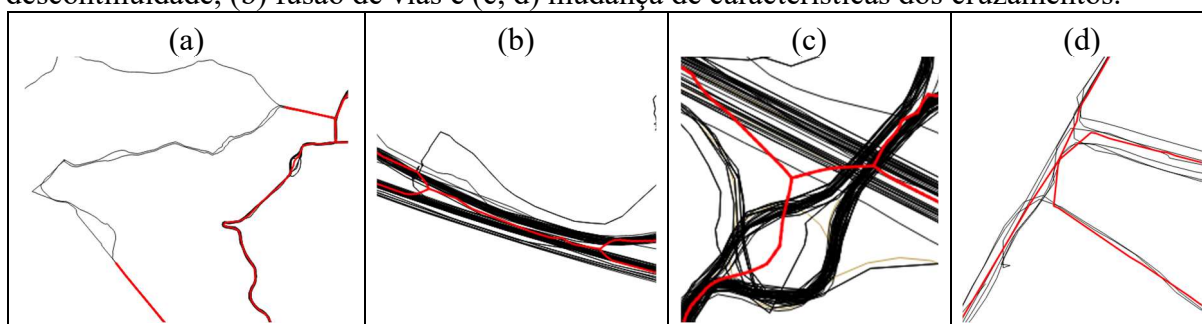
A avaliação qualitativa procurou verificar visualmente a qualidade dos resultados, apurando a condição final da topologia (preservação dos cruzamentos) verificando alguns aspectos do método. Já a avaliação quantitativa trouxe uma compilação de índices numéricos que ajudam a entender o comportamento global dos resultados alcançados.

Visualmente, foi possível verificar que os resultados são inconsistentes quando não há redundância mínima de três trajetórias, conforme pode ser verificado na Figura 60a, que apresenta descontinuidades na rodovia inferida (linhas vermelhas) quando constam apenas uma ou duas trajetórias. Este comportamento é previsto na proposição do método e até mesmo desejável, pois é coerente deduzir que ocorrências tão baixas possam significar que a via é problemática ou até mesmo intrafegável. Outro aspecto se refere as rodovias paralelas muito próximas (no caso destes experimentos com distâncias inferiores a 25 metros), que foram fusionadas (linhas vermelhas na Figura 60b). Esta configuração é relativamente comum em cenários urbanos e semiurbanos, podendo ser contornada com a redução do limiar do *buffer*



utilizado na dilatação, mesmo porque esses cenários normalmente contam com alta redundância. Quanto aos cruzamentos, foi possível verificar que a filtragem pode trazer inconvenientes em geometrias mais complexas (Figura 60c,d), fusionando diferentes cruzamentos em um único, tornando a topologia equivocada. Novamente este tipo de erro pode ser minimizado com a mudança nos parâmetros do processo de colapso dos cruzamentos. Assim, devido à importância de preservação de uma correta topologia, é recomendada uma verificação, por parte do operador humano, dos cruzamentos envolvendo quatro ou mais vias.

Figura 60. Recortes para destaque dos principais erros encontrados nos resultados, como (a) descontinuidade, (b) fusão de vias e (c, d) mudança de características dos cruzamentos.



Considerando que o resultado do método é um mapa de rodovias inferidas (*MI*), para realizar a avaliação quantitativa foi utilizado um mapa de rodovias de referência (*MR*) obtido a partir da vetorização manual do eixo central das rodovias em imagens *RapidEye*. Só foram restituídas as rodovias recobertas por trajetórias GPS com traçado plenamente identificáveis nas imagens. Em seguida foram amostrados pontos a cada 1 m nas linhas poligonais que formam o *MR* e calculadas as distâncias perpendiculares em relação às linhas poligonais homólogas em *MI*. Essas distâncias são as discrepâncias utilizadas nos cálculos dos indicadores numéricos (Erro Máximo e RMSE) apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Indicadores quantitativos da qualidade dos mapas de rodovia inferidos (*MI*).

Conjunto de Trajetórias	Comprimento (km)	Área (km <sup>2</sup> )	MR (km)	MI (km)	Erro Max. (m)	RMSE (m)
CTR1	2869,47	5	32,89	23,63	48,03	9,59
CTR2	575,38	25	18,02	17,36	16,84	3,82
CTR3	208,28	13	23,62	21,32	18,46	5,63
CTR4	155,51	58	33,69	32,73	15,61	4,71
CTR5	289,44	110	42,00	41,36	19,24	5,57
CTR6	4309,14	520	254,26	216,56	39,96	4,38

O conjunto CTR1 alcançou os piores resultados com um RMSE de 9,59 m e erro máximo de 48,03 m, apesar da alta taxa de redundância nas trajetórias. Isto pode ser explicado por se

tratar de cenário totalmente urbano (que foge da proposta do método), com trilhas sofrendo severamente os efeitos de multicaminhos (MODSCHING et al., 2006), exigindo uma reconfiguração nos parâmetros (principalmente nos valores de *buffer*) para alcançar melhores resultados. Já o CTR6 apresentou um erro máximo de 39,96 m apesar de uma predominância rural, isto em razão da presença de um cruzamento bastante complexo (Figura 60c) que provocou altos valores de discrepância no local, conforme pode ser observado pelo RMSE de apenas 4,38 m. Os conjuntos CTR2, CTR3, CTR4 e CTR5, ficaram em média com os RMSE inferiores a 5 m e o erro máximo inferiores a 20 m. Estes valores são extremamente relevantes ao considerar que os mapas inferidos serão utilizados como entrada para um ajuste geométrico (subseção 3.2.2) utilizando imagens *RapidEye* com resolução espacial de 5 m, ou seja, na maior parte dos conjuntos os RMSE são inferiores a um pixel e os erros máximos a quatro pixels da imagem.

De forma geral o método se comportou conforme o esperado, apresentando melhores resultados nos cenários predominantemente rurais, com rodovias e cruzamentos simples. Uma característica relevante do método é a economia de recursos computacionais (processamento e armazenamento), pois os dados são processados em sua forma vetorial, não havendo a conversão para o formato matricial, como é comum na inferência por operações morfológicas presentes na literatura. Outra característica decorrente de realizarmos operações morfológicas com dados vetoriais, que são estruturas simples, é a possibilidade de processar grandes quantidades de trajetórias distribuídas em extensas áreas em um único processamento, como foi o caso do CTR6 com 520 km<sup>2</sup>, tornando este método extremamente robusto. Esta constância nas características dos dados durante o processamento viabiliza e facilita a intervenção humana em qualquer etapa.

Mesmo sendo o pior resultado por se tratar de área urbana, para fins de comparação com os resultados presentes na literatura, uma avaliação geométrica complementar foi realizada no CTR1 utilizando o método proposto por Liu et al. (2012) e utilizando o mapa de rodovias de referência (*MR*) fornecido pela UIC. O autor estratifica as discrepâncias contabilizando a fração dos pontos que estão dentro de determinados limiares de largura de *buffer* e o comprimento correspondente na linha poligonal (*cp*), bem como o comprimento total de *MR* (*cpMR*) e de *MI* (*cpMI*). Com base nesse comprimento são calculados os índices de Retenção e Precisão. A Retenção (Equação 74) indica a fração de estradas do *MR* que foram recuperadas e a Precisão (Equação 75) a fração de estradas no *MI* que são relevantes dentro do limiar estabelecido.

$$\text{Reten\c{c}o} = \frac{cp}{cpMR} \quad (74)$$

$$\text{Precis\c{a}o} = \frac{cp}{cpMI} \quad (75)$$

Por fim, esses \u00edndices s\c{a}o combinados em um \u00fanico valor escalar (*F-score*), computado por:

$$F = \frac{2 \times \text{precis\c{a}o} \times \text{reten\c{c}o}}{\text{precis\c{a}o} + \text{reten\c{c}o}}. \quad (76)$$

Com base nesse m\u00e9todo foram calculados os valores da Tabela 10, que pode ser comparado com os valores alcan\u00e7ados pelos m\u00e9todos de Biagioni e Eriksson (2012) na Tabela 11 e Qiu e Wang (2016) na Tabela 12.

Tabela 10. Resultados alcan\u00e7ados pelo m\u00e9todo proposto aplicado no CTR1.

Limiar de Discrep\u00e2ncia (m)	<i>cp</i> (km)	Reten\u00e7\u00e3o	Precis\u00e3o	<i>F-score</i>
5	10,47	0,318	0,443	0,370
10	16,93	0,515	0,716	0,599
15	20,00	0,608	0,846	0,708
20	21,31	0,648	0,902	0,754
50	23,13	0,703	0,979	0,818

O m\u00e9todo de Biagioni e Eriksson (2012) produz a infer\u00eancia do mapa de rodovias utilizando a esqueletiza\u00e7\u00e3o do KDE, com uma s\u00e9rie de p\u00f3s-processamentos para melhoria da geometria e da topologia.

Tabela 11. Resultados do m\u00e9todo de Biagioni e Eriksson's (2012) aplicado no CTR1.

Limiar de Discrep\u00e2ncia (m)	<i>cp</i> (km)	Reten\u00e7\u00e3o	Precis\u00e3o	<i>F-score</i>
5	15,11	0,459	0,617	0,526
10	20,22	0,615	0,826	0,705
15	22,71	0,690	0,927	0,791
20	23,57	0,717	0,962	0,821
50	24,01	0,730	0,980	0,837

Qiu e Wang (2016) prop\u00f5em um algoritmo de infer\u00eancia de mapa de rodovias pelo processo de segmenta\u00e7\u00e3o e agrupamento de pontos utilizando a clusteriza\u00e7\u00e3o espacial baseada em densidade de aplica\u00e7\u00f5es com ru\u00eddo, com restri\u00e7\u00e3o de orienta\u00e7\u00e3o para particionar todo o conjunto de pontos em agrupamentos que representam segmentos rodovi\u00e1rios.

Tabela 12. Resultados do método de Qiu e Wang (2016) aplicado no CTR1.

Limiar de Discrepância (m)	$cp$ (km)	Retenção	Precisão	$F$ -score
5	27,93	0,679	0,902	0,775
10	29,96	0,728	0,968	0,831
15	30,09	0,732	0,972	0,835
20	30,13	0,733	0,974	0,836
50	30,19	0,734	0,975	0,838

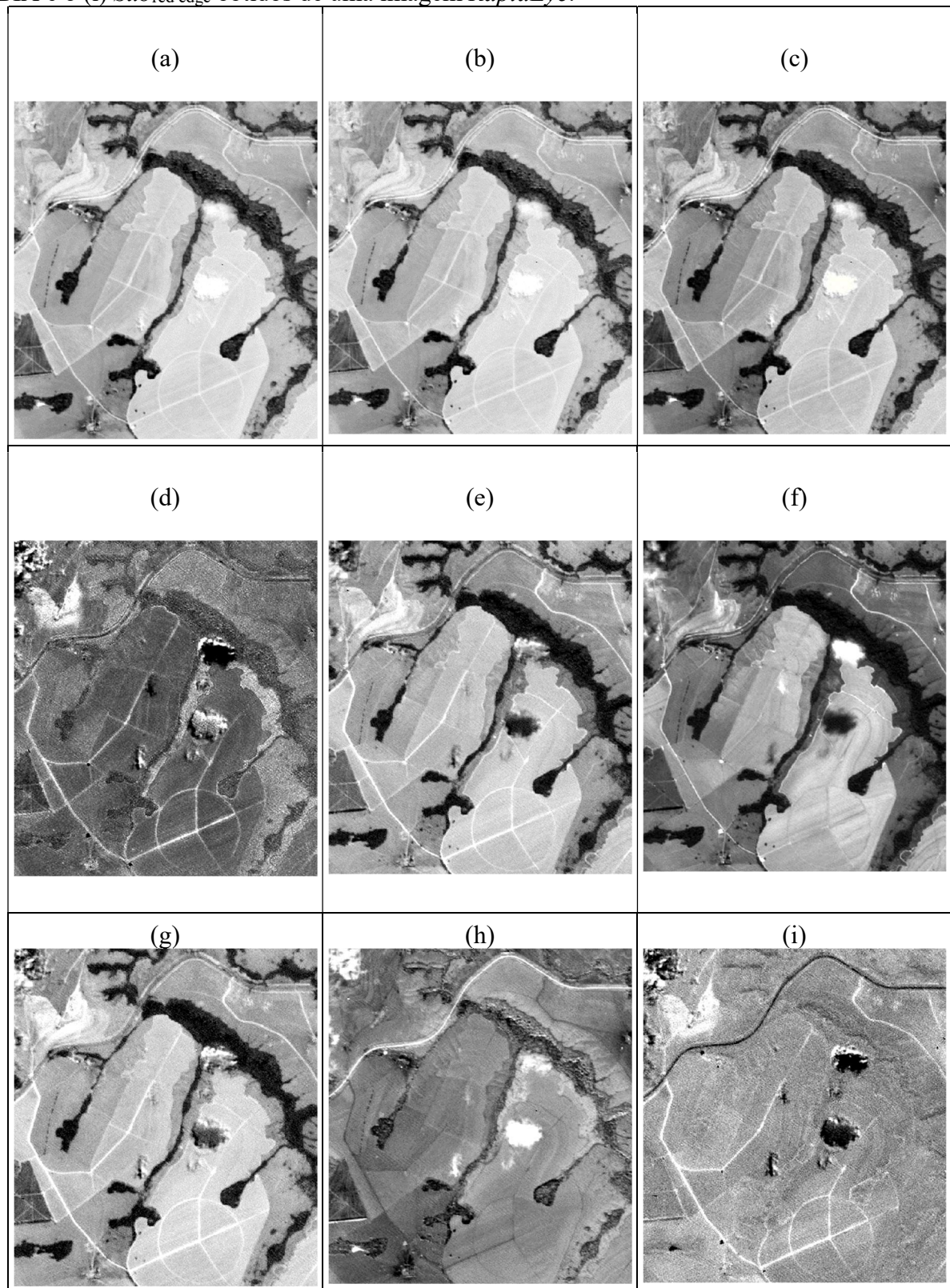
No método de Qiu e Wang (2016) o  $F$ -score estabiliza a partir do limiar de 10 m, enquanto o método de Biagioni e Eriksson (2012) isso ocorre a partir dos 20 m e no método proposto a partir dos 50 m. Isto era esperado em razão dos valores do RMSE e do Erro Máximo próximo a 50 m. Estes resultados podem ser melhorados com a reconfiguração de parâmetros (Tabela 8) para o cenário urbano com alta densidade de trajetórias, porém é desejado que isso ocorra de forma automática no futuro.

#### 4.1.2 Experimentos de extração do eixo das rodovias em imagens *RapidEye*

Inicialmente, para verificar o desempenho do índice proposto foi realizada uma comparação visual entre os resultados alcançados pelo  $sub_{red\ edge}$  e alguns índices populares do Sensoriamento Remoto (JENSEN, 2006), sendo:

- Índices de Vegetação: *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI (Figura 61a), *Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI (Figura 61b) e *Ratio Vegetation Index* – RVI (Figura 61c). Tais índices são sensíveis a vegetação, apresentando baixa resposta para as demais feições. Assim, para facilitar a comparação visual com os demais resultados, os valores dos índices foram multiplicados por -1 para apresentação na Figura 61;
- Índices de Solo: *Redness Index* – RI (Figura 61d), *Color Index* - CI (Figura 61e), *Brightness Index* – BI (Figura 61f), *Saturation Index* – SI (Figura 61g). Tais índices são utilizados para destacar propriedades do solo e por consequência são competentes em destacá-lo em relação ao restante da paisagem;
- Índice de Construção: *Built-up Area Index* – BIA (Figura 61h). A imensa maioria dos índices para destacar feições feitas pelo homem, como construções e rodovias, são baseado nas bandas do sensor *Landsat*, tornando inviável o uso em outros sensores ou exigindo cuidadosas adaptações.

Figura 61. Recortes dos índices (a) NDVI, (b) SAVI, (c) RVI, (d) RI, (e) CI, (f) BI, (g) SI, (h) BIA e o (i) *Sub<sub>red</sub> edge* obtidos de uma imagem *RapidEye*.



De forma geral os índices de vegetação conseguem homogeneizar a resposta do asfalto e do solo exposto (feições que não são vegetação). Considerando que pode haver faixas de solo

no entorno das rodovias asfaltadas em áreas rurais, esse comportamento pode provocar uma degradação na geometria das bordas, prejudicando o processo de extração. Esta condição pode ainda provocar o deslocamento do eixo da rodovia se houver uma faixa de solo mais larga em um dos lados da rodovia asfaltada. Além disso, as cenas resultantes desses índices são bastante complexas, implicando em muitos falsos positivos. Já nos resultados dos índices de solo, como era de se esperar, é possível notar um ganho de intensidade do solo em detrimento ao asfalto, inviabilizando o seu uso em uma proposta de presença integrada das rodovias na imagem. Este comportamento se repete de forma inversa no BIA, que foi muito eficiente em destacar o asfalto, mas suprimiu completamente o solo exposto. Por fim, dentro do grupo testado, o *subred edge* mostrou-se a melhor opção para os propósitos desta pesquisa, oferecendo a possibilidade de extração de rodovias de solo exposto e cobertura asfáltica por meio de uma única imagem.

Já para avaliar o processo proposto na subseção 3.3.2 foram realizados cinco experimentos com imagens *RapidEye 3A* (25 km x 25 km), conforme Tabela 13, que foram avaliados posteriormente com critérios qualitativos e quantitativos.

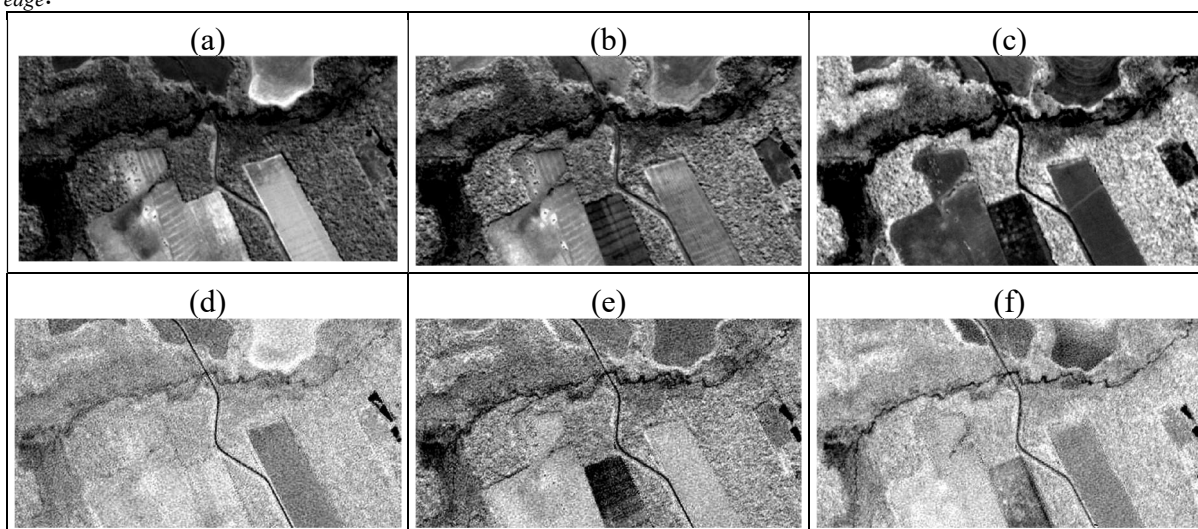
Tabela 13. Resumo dos experimentos realizados em cinco cenas com o processo proposto.

Identificação da cena	Coberturas (un.)	Rodovias asfalto (km)	Rodovias solo exposto (km)	Total da malha de extraída (km)
Cena 1	4	0,00	137,20	137,20
Cena 2	3	8,25	57,80	66,05
Cena 3	3	44,93	112,07	157,00
Cena 4	4	0,00	82,44	82,44
Cena 5	4	6,50	50,58	57,08

A avaliação qualitativa procurou verificar por meio de uma inspeção visual realizada por um operador humano, se os resultados alcançados são satisfatórios, apurando características relevantes, limitações e potencialidades do processo proposto. Para o caso particular das rodovias asfaltadas, com uma inspeção visual nos resultados alcançados pelo processo é possível verificar a eficiência da imagem sintética como insumo para a extração, apresentando poucas descontinuidades. Um dos motivos disto ocorrer é o fato das rodovias asfaltadas estarem presentes em todas as coberturas das cenas (ou na grande maioria), assim sua resposta espectral é reforçada, aumentando consideravelmente o contraste com o restante da paisagem. A constância na largura desta feição em diferentes coberturas também contribui para uma imagem sintética com bordas regulares, o que implica em maior sucesso no processo de extração pelo detector de linhas de *Steger*.

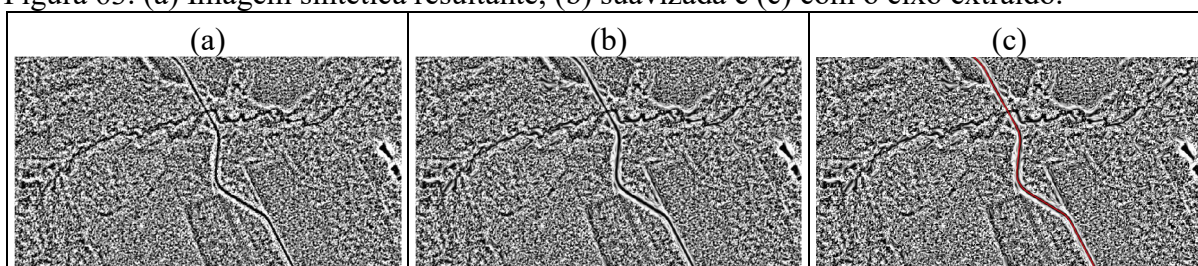
Tratando ainda da relevância da imagem sintética para a extração das vias asfaltadas, é possível observar nos recortes da Figura 62 que as coberturas 2012 (Figura 62a), 2013 (Figura 62b) e 2014 (Figura 62c) não apresentam individualmente uma caracterização suficientemente robusta das vias na banda NIR. Já as *sub<sub>red</sub> edge* derivadas permitem individualmente a identificação precisa do corpo da rodovia (Figura 62d,e,f).

Figura 62. Banda NIR das coberturas (a) 2012, (b) 2013 e (c) 2014 e (d, e, f) respectivas *sub<sub>red</sub> edge*.



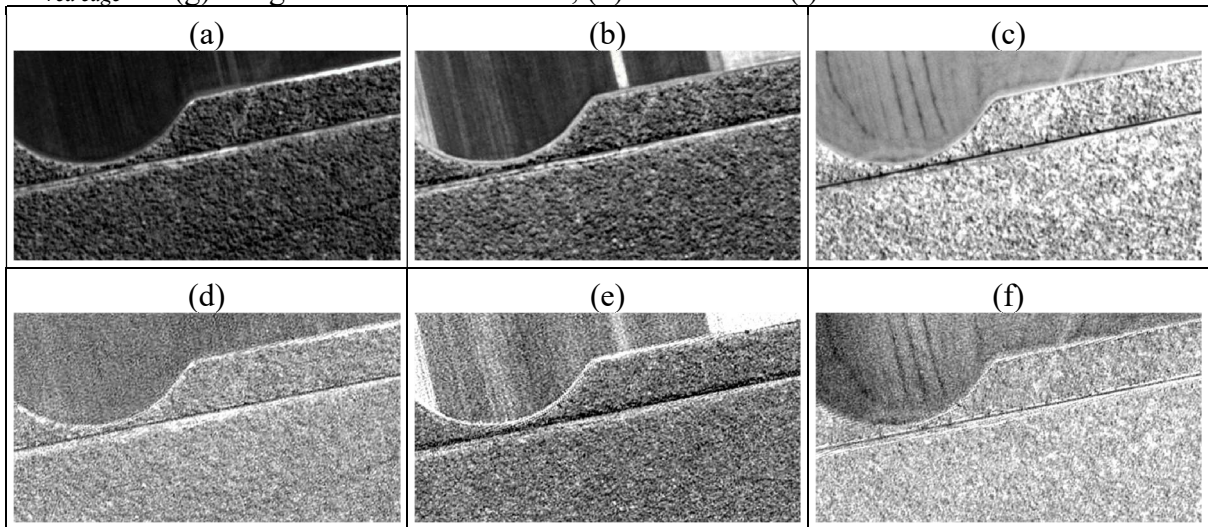
Por fim, a imagem sintética apresenta a rodovia com grande destaque em relação ao restante da paisagem (Figura 63a), que ao ser suavizada (Figura 63b) permite uma extração integral do eixo (Figura 63c).

Figura 63. (a) Imagem sintética resultante, (b) suavizada e (c) com o eixo extraído.



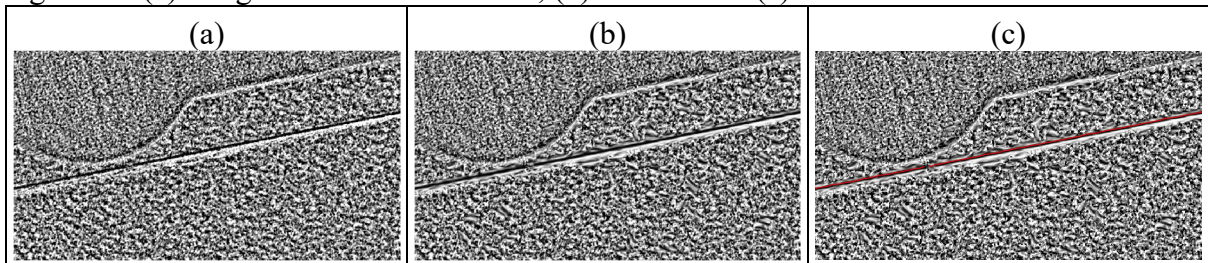
No entanto, nem sempre as imagens *sub<sub>red</sub> edge* serão, individualmente, suficientes para o delineamento da rodovia. Na Figura 64 são apresentadas as respostas do NIR para três coberturas (Figura 64a,b,c) e suas respectivas *sub<sub>red</sub> edge* (Figura 64d,e,f) que individualmente não são suficientemente robustas para o processo de extração.

Figura 64. Banda NIR das coberturas (a) 2011, (b) 2012 e (c) 2013; (d, e, f) com respectivas *subred edge* e a (g) Imagem sintética resultante, (h) suavizada e (i) com o eixo extraído.



Para este trecho foi fundamental a operação de composição da imagem sintética (Figura 65a), que após a suavização (Figura 65b) permitiu a extração de forma eficiente (Figura 65c).

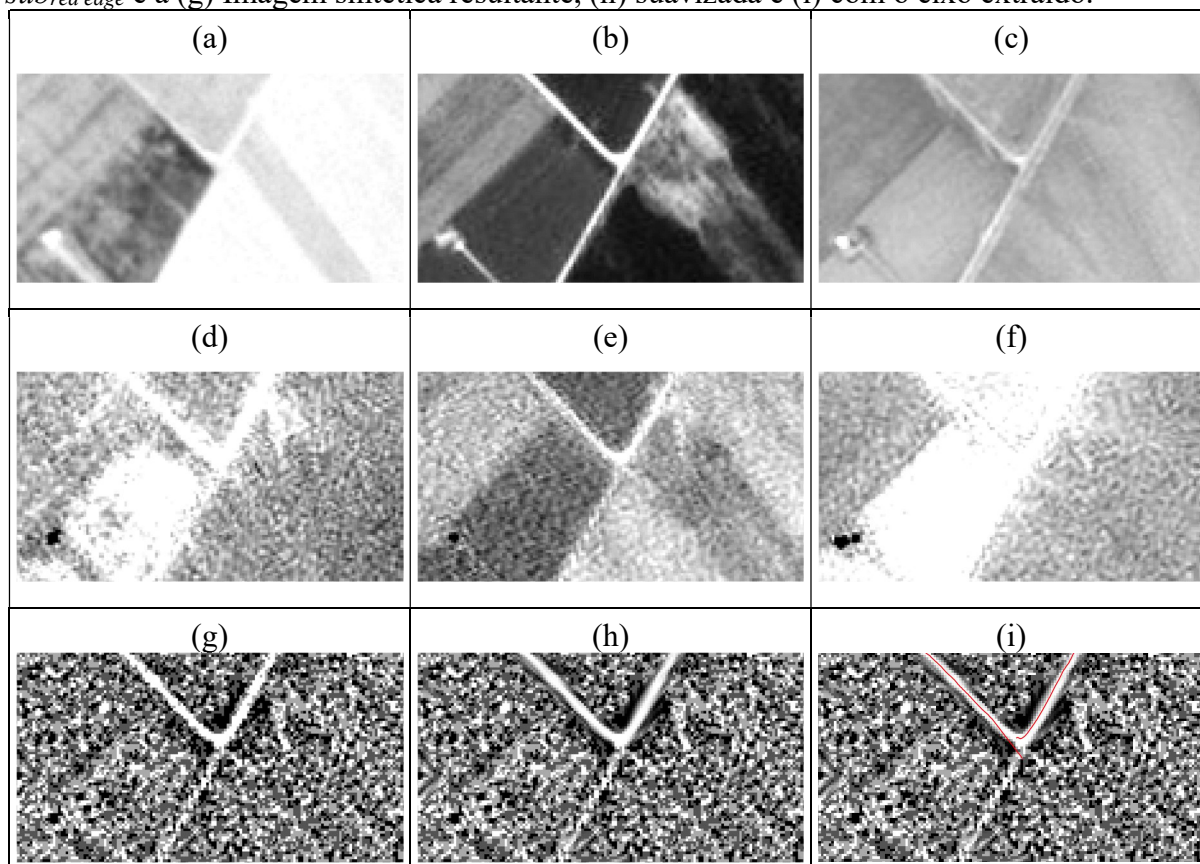
Figura 65. (a) Imagem sintética resultante, (b) suavizada e (c) com o eixo extraído.



Ao contrário das rodovias asfaltadas, as de solo exposto raramente apresentam o mesmo comportamento geométrico (e em alguns casos radiométrico) em todas as coberturas, variando em largura e homogeneidade. É possível verificar o efeito deste comportamento na Figura 66 que apresenta na banda vermelha um cruzamento de três vias (Figura 66a,b,c). Duas vias deste cruzamento têm largura variando entre dois e três pixels e uma tem a largura variando entre um e dois pixels. As *subred edge* correspondentes apresentam uma degradação severa da via mais estreita (Figura 66d,e,f), comprometendo assim sua presença na imagem sintética (Figura 66g). Generalizando, o processo apresenta bons resultados para rodovias de solo exposto com largura próxima a três ou mais pixels nas diferentes coberturas.



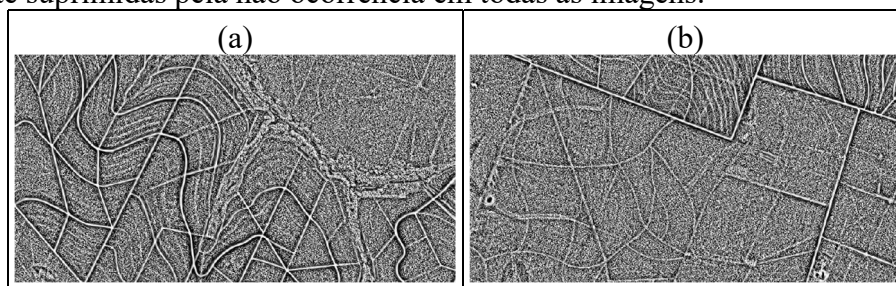
Figura 66. Banda NIR das coberturas (a) 2011, (b) 2012 e (c) 2013; (d, e, f) com respectivas *subred edge* e a (g) Imagem sintética resultante, (h) suavizada e (i) com o eixo extraído.



Outro aspecto relevante neste exemplo são as áreas das *subred edge* com alta intensidade de brilho na vizinhança das rodovias (Figura 66d,f). Este efeito é provocado pela sensibilidade da banda *red edge* para a vegetação seca (BLACKBRIDGE, 2016), podendo representar um problema para delimitação da rodovia de solo exposto se ocorrer em várias coberturas.

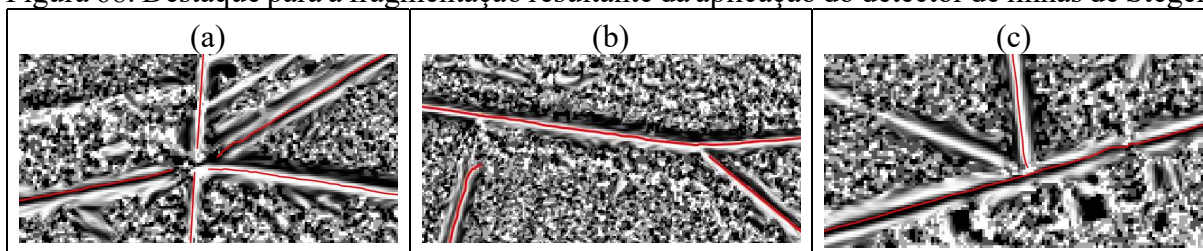
Durante a extração dos eixos das rodovias de solo exposto foi apurado um maior número de falsos positivos do que no caso da extração de rodovias asfaltadas, conforme já esperado. Apesar do processo proposto procurar minimizar este problema explorando as coberturas, o grau de sucesso desta abordagem é dependente da aleatoriedade das feições que provocam estas irregularidades. A Figura 67a, por exemplo, apresenta um recorte da imagem sintética com a presença de um conjunto de curvas de nível e aceiros que não variaram geometricamente em nenhuma das coberturas disponíveis e assim acabaram delineadas como as rodovias. Já a Figura 67b apresenta aceiros que variaram entre as coberturas e conseqüentemente foram parcialmente suprimidas na imagem sintética, impedindo sua extração e reduzindo os falsos positivos. Assim, dentro do método proposto, a única maneira de reduzir ainda mais esses falsos positivos é acrescentando novas coberturas à imagem sintética.

Figura 67. Curvas de nível (a) reafirmadas em função da recorrência em várias imagens e (b) parcialmente suprimidas pela não ocorrência em todas as imagens.



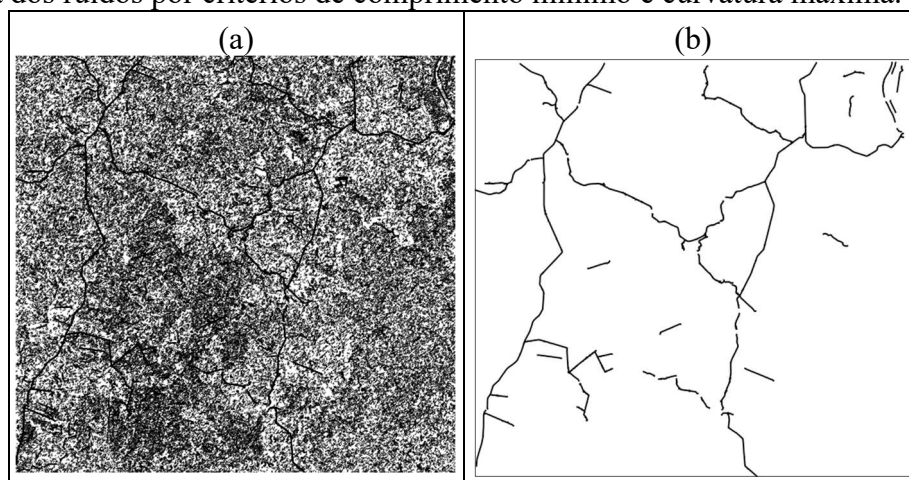
Um aspecto que afeta as extrações, independentemente do tipo de cobertura da rodovia, são as eventuais desconexões nos cruzamentos (Figura 68), que dependendo do objetivo para a malha extraída exigiria a recuperação por processos específicos, não sendo o caso deste trabalho.

Figura 68. Destaque para a fragmentação resultante da aplicação do detector de linhas de Steger.



O processo de filtragem dos ruídos também se mostrou eficiente (Figura 69). Como previsto, os falsos positivos paralelos e próximos às vias tiveram de ser excluídos manualmente para não comprometer o processo de conflação da malha.

Figura 69. Cena completa (a) do resultado do extrator de linhas de Steger e (b) filtragem geométrica dos ruídos por critérios de comprimento mínimo e curvatura máxima.



Por fim, é relevante salientar que devido à similaridade do comportamento radiométrico das imagens sintéticas os parâmetros do filtro CED permaneceram fixos nos cinco experimentos

realizados. O detector de linhas de Steger, por outro lado, teve seus parâmetros readequados a cada imagem sintética processada, havendo pequenos ajustes. Considerando que as imagens sintéticas recobrem uma área de 625 km<sup>2</sup> é razoável a necessidade de reconfigurações.

Procurando subsidiar a avaliação qualitativa e verificar a consistência dos resultados mediante indicadores numéricos, foi realizada uma avaliação quantitativa que utilizou o método descrito na subseção 3.2.4 e gerou os resultados apresentados na Tabela 14.

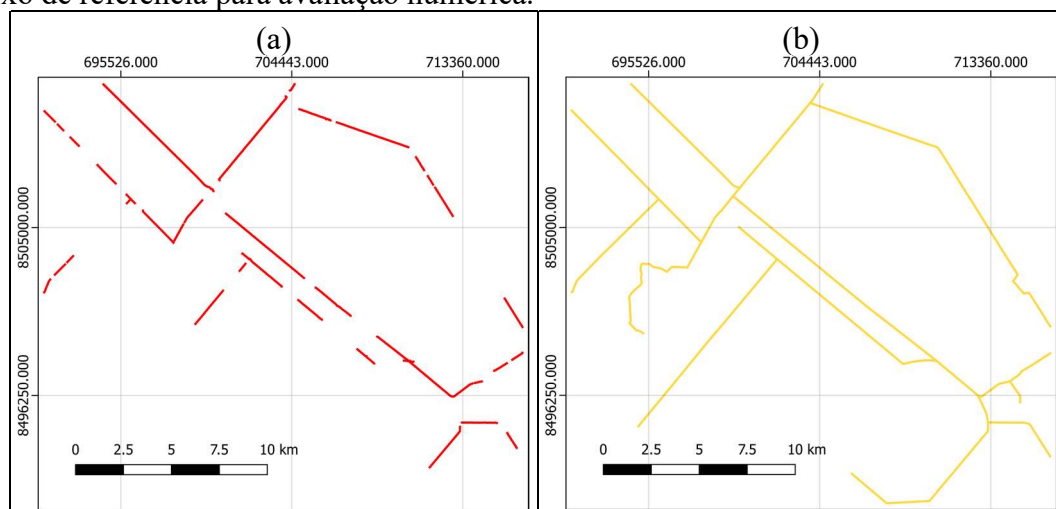
Tabela 14. Avaliação quantitativa com indicadores da qualidade e precisão das extrações.

<i>RapidEye</i>	Rodovias de referência (km)	Completeza (%)	Correção (%)	Qualidade (%)	RMSE (m)
Cena 1	135,82	76	55	47	7,23
Cena 2	123,67	45	71	38	8,76
Cena 3	180,21	68	71	53	5,35
Cena 4	95,34	70	54	44	8,15
Cena 5	77,14	52	65	41	7,76

O eixo de referência utilizado na avaliação quantitativa foi obtido pela vetorização manual das vias presentes na imagem sintética, utilizando como dado auxiliar as coberturas *RapidEye 3A* e dados vetoriais como a malha IBGE de Transporte Rodoviário na escala 1:250.000 e a malha de rodovias do projeto *OpenStreetMap*.

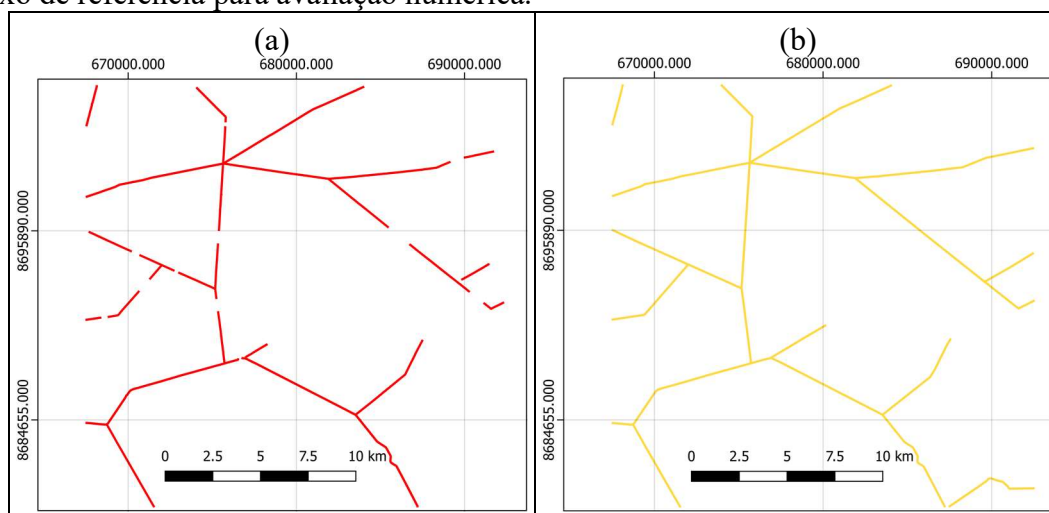
O pior resultado alcançado se refere a Cena 2 (Figura 70). Além dos trechos fragmentados, que não representam necessariamente um problema, houve a omissão completa de grandes segmentos. Tais omissões ocorreram em virtude da já explicada degradação provocada pela variação na largura das vias (de 1 a 2 pixels) nas coberturas disponíveis. Apesar da baixa completeza, os segmentos de eixos extraídos permitem o processo de conflação V2V, atingindo assim o objetivo do processo proposto.

Figura 70. Cena 2 com (a) segmentos dos eixos das rodovias extraídos da imagem sintética e (b) eixo de referência para avaliação numérica.



Já o melhor resultado foi alcançado pela Cena 3 (Figura 71). Nesta cena 25% da malha são rodovias asfaltadas, que foram extraídas integralmente com pequenas fragmentações. As larguras das vias de solo exposto variavam de 2 a 4 pixels nas diferentes coberturas, resultando em uma imagem sintética propícia para a extração das vias de solo exposto.

Figura 71. Cena 3 com (a) Segmentos dos eixos das rodovias extraídos da imagem sintética e (b) eixo de referência para avaliação numérica.



Os resultados numéricos indicam a viabilidade do processo proposto para a extração dos eixos de rodovias em imagens sintética obtidas por processamentos de bandas das imagens *RapidEye*. A imagem *sub<sub>red</sub> edge* proposta foi de fundamental importância para os resultados alcançados, reduzindo severamente a quantidade de detalhes na cena e conseguindo destacar as vias de asfalto e o solo exposto em relação ao restante da paisagem. Por fim, os problemas encontrados de descontinuidade nos eixos extraídos podem ser minimizados por processos complementares executados durante a extração ou em pós-processamentos. No entanto, considerando que a malha extraída será utilizada num processo de conflação com uma malha já existente e topologicamente correta, conforme descrito na subseção 3.2.2, os resultados alcançados atendem perfeitamente os objetivos.

## 4.2 Experimentos do Método Proposto

Nesta seção serão apresentados os experimentos realizados para validação do método proposto na subseção 3.2. Os resultados serão avaliados conforme proposto na subseção 3.2.4, consistindo de avaliações qualitativas e quantitativas. Foram realizados seis experimentos,

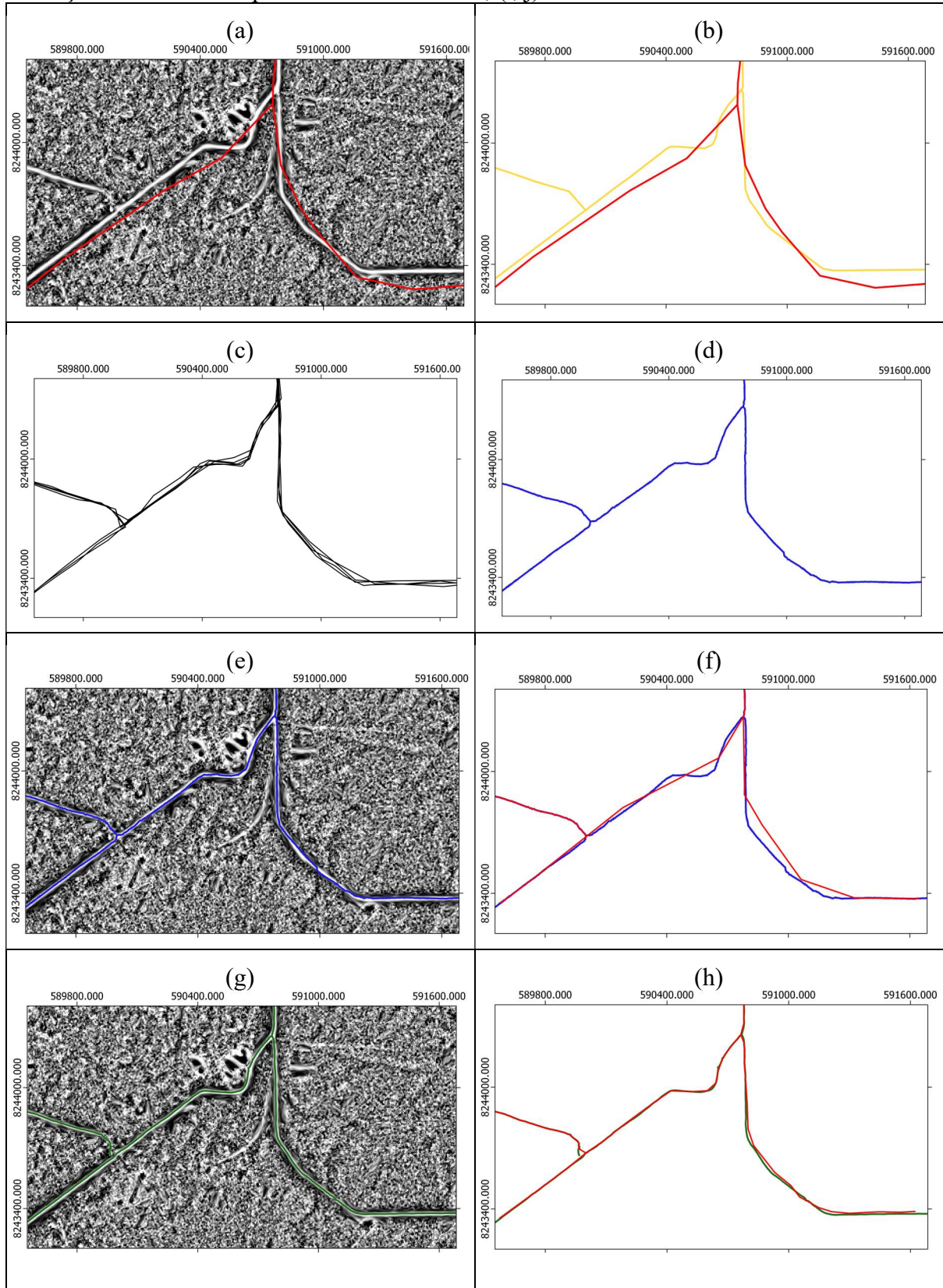
sendo quatro com malhas de aproximadamente 5 km e dois com mais de 100 km, conforme Tabela 15.

Tabela 15. Avaliação numérica dos trechos processados.

Trechos de Rodovias	Identificador	Comprimento (km)
Trecho 1	TR1	3,83
Trecho 2	TR2	4,90
Trecho 3	TR3	5,47
Trecho 4	TR4	3,46
Trecho 5	TR5	135,82
Trecho 6	TR6	123,67

Na avaliação qualitativa, para viabilizar a inspeção visual dos resultados alcançados nas etapas intermediárias do método, serão apresentados os resultados dos experimentos realizados com os trechos TR1, TR2, TR3 e TR4 (Figura 72). Inicialmente é apresentada a malha IBGE 1:250.000 a ser atualizada, primeiro sobreposta à imagem sintética obtida via *subred edge* (Figura 72a) e em seguida sobreposta ao eixo de referência obtido via vetorização manual das rodovias nas imagens *RapidEye* (Figura 72b), o mesmo eixo a ser utilizado na análise numérica. Para ilustrar o desenvolvimento do processo de expansão da malha são apresentadas as trajetórias GPS obtidas na base de dados do projeto *OpenStreetMap* (Figura 72c) e o resultado da inferência de mapas de rodovias (Figura 72d), bem como sua sobreposição na imagem sintética (Figura 72e). Esse eixo de referência inferido é então utilizado no processo de conflação via *rubber-sheeting* com a malha IBGE (Figura 72f), tornando-a uma malha expandida. O processo de ajuste da malha expandida inicia com a extração dos segmentos de eixo, aqui apresentados na Figura 72g, que então são utilizados em um novo processo de conflação via *rubber-sheeting* com a malha expandida, tornando-a uma malha ajustada (Figura 72h). Por fim, a malha ajustada é processada via *snakes* de redes, resultando no eixo refinado de descrição das rodovias, aqui apresentado sobreposto à imagem sintética (Figura 72i) e sobreposto ao eixo de referência (Figura 72j). Após a apresentação dos resultados serão feitas as análises baseadas na interpretação visual.

Figura 72. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) confluência entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via *Steger*; (h) confluência entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refinamento via *snakes* de redes.



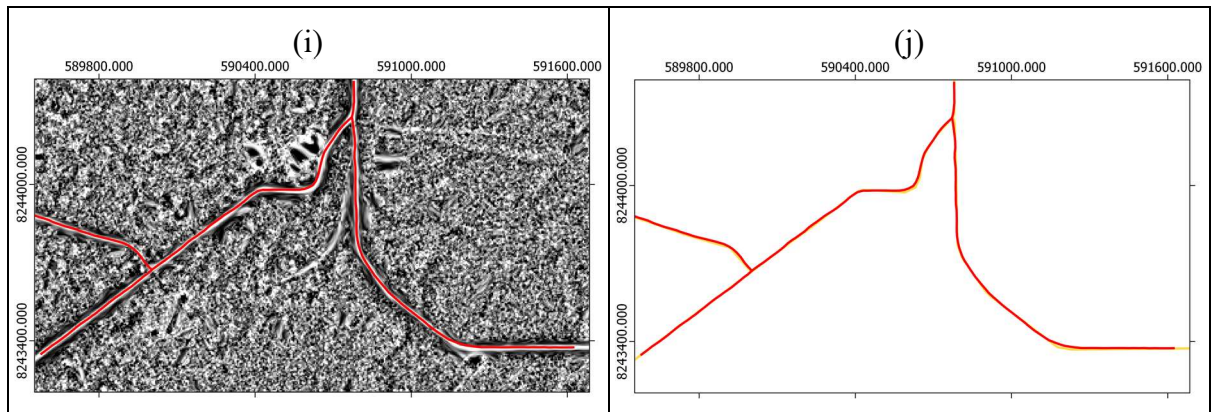
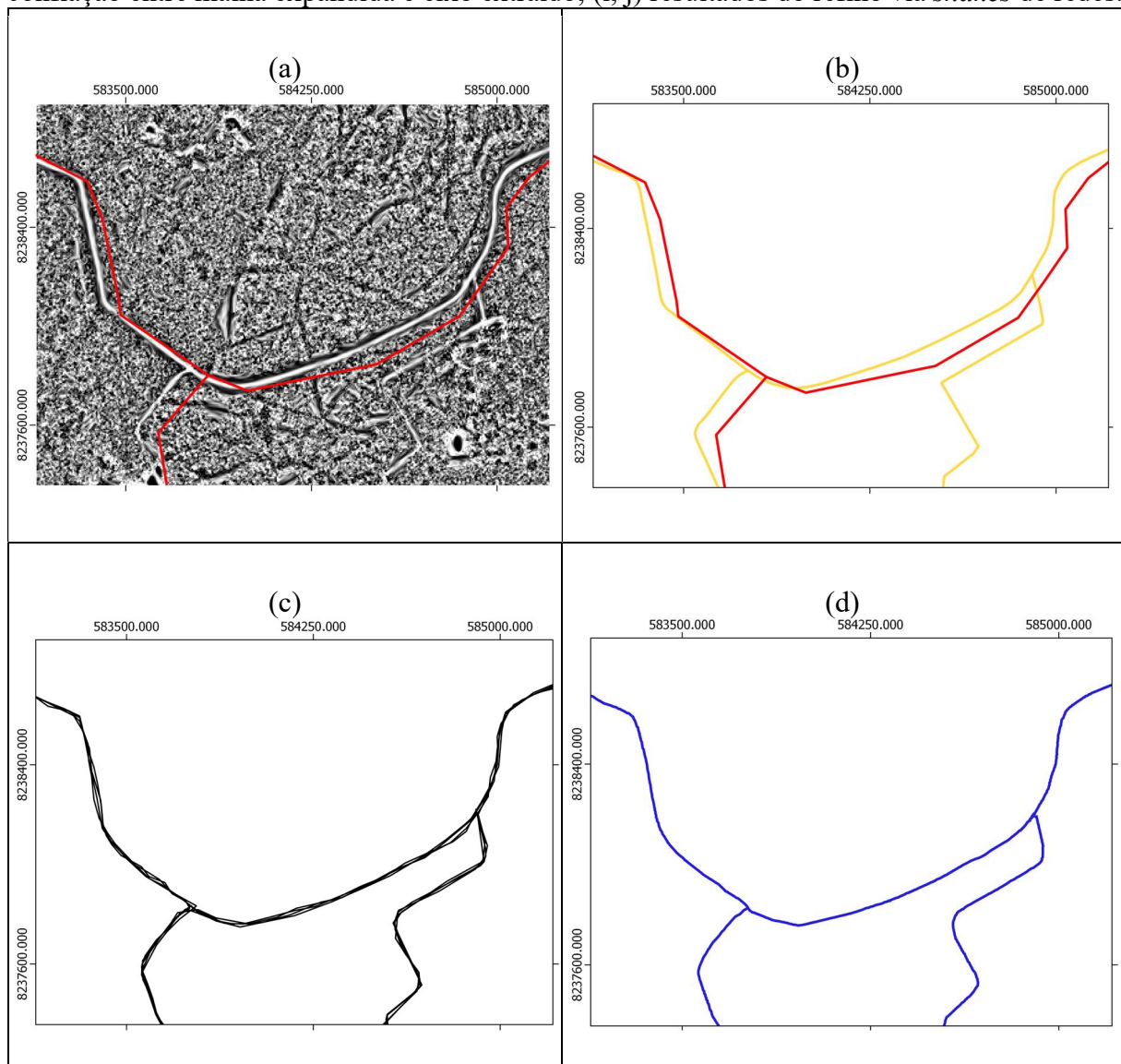


Figura 73. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) confluência entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via *Steger*; (h) confluência entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refinamento via *snakes* de redes.



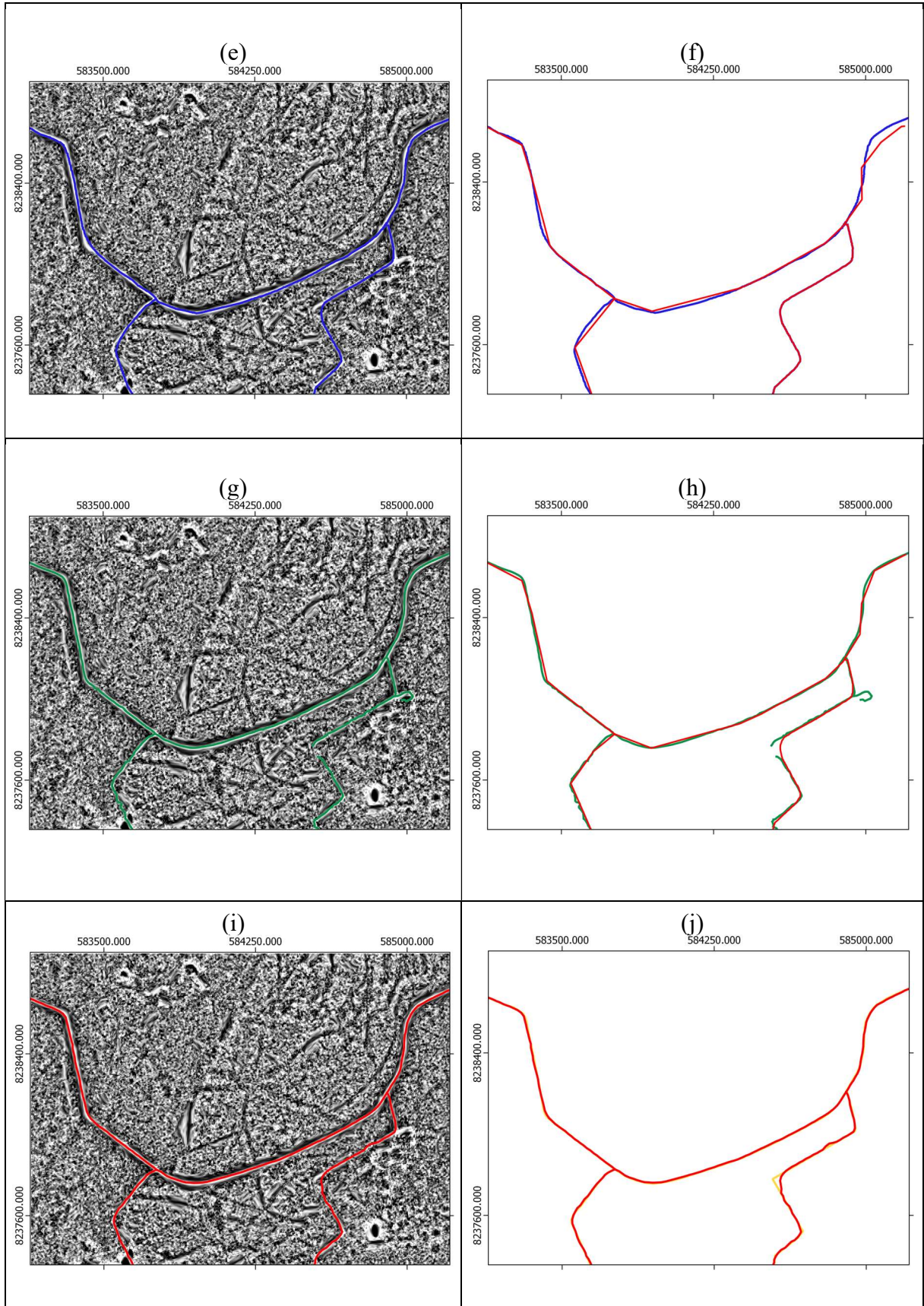
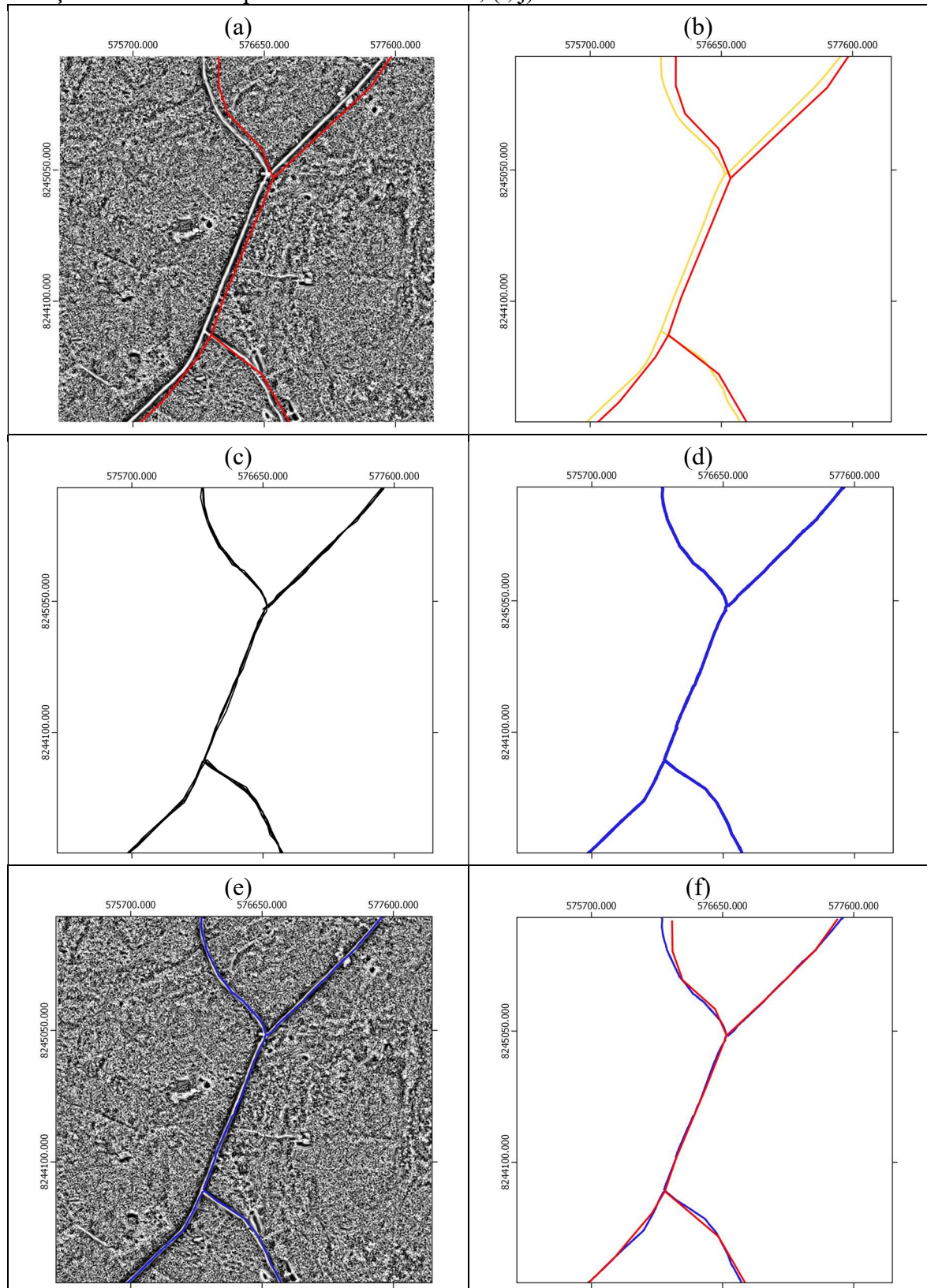




Figura 74. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) confluência entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via *Steger*; (h) confluência entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refino via *snakes* de redes.



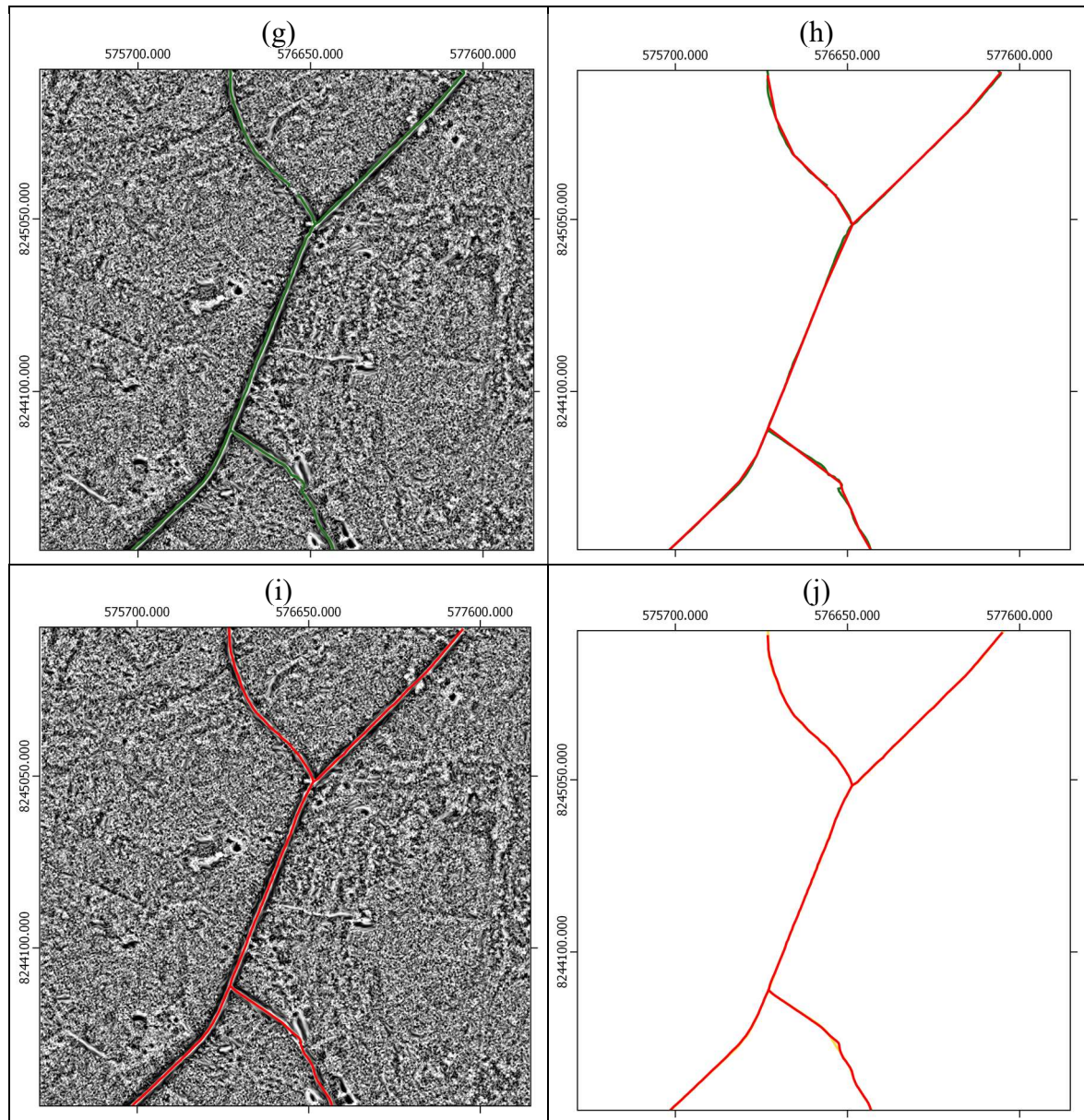
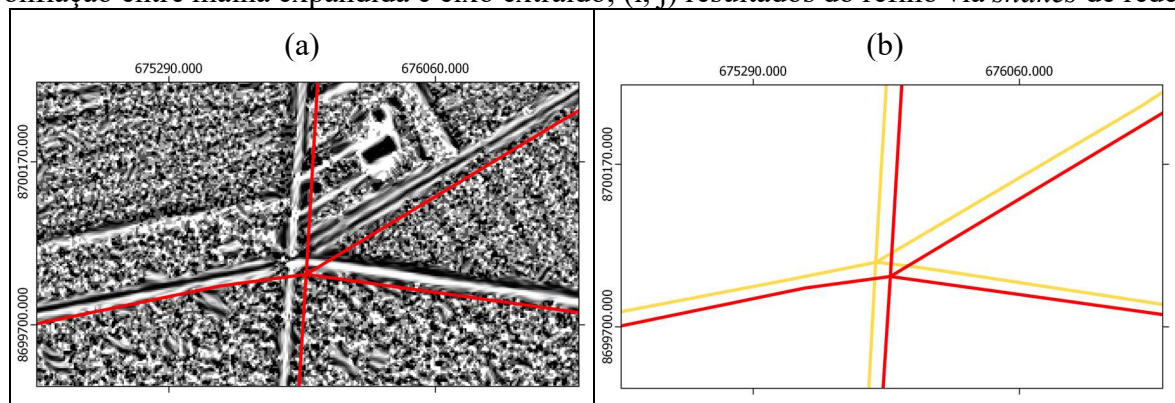
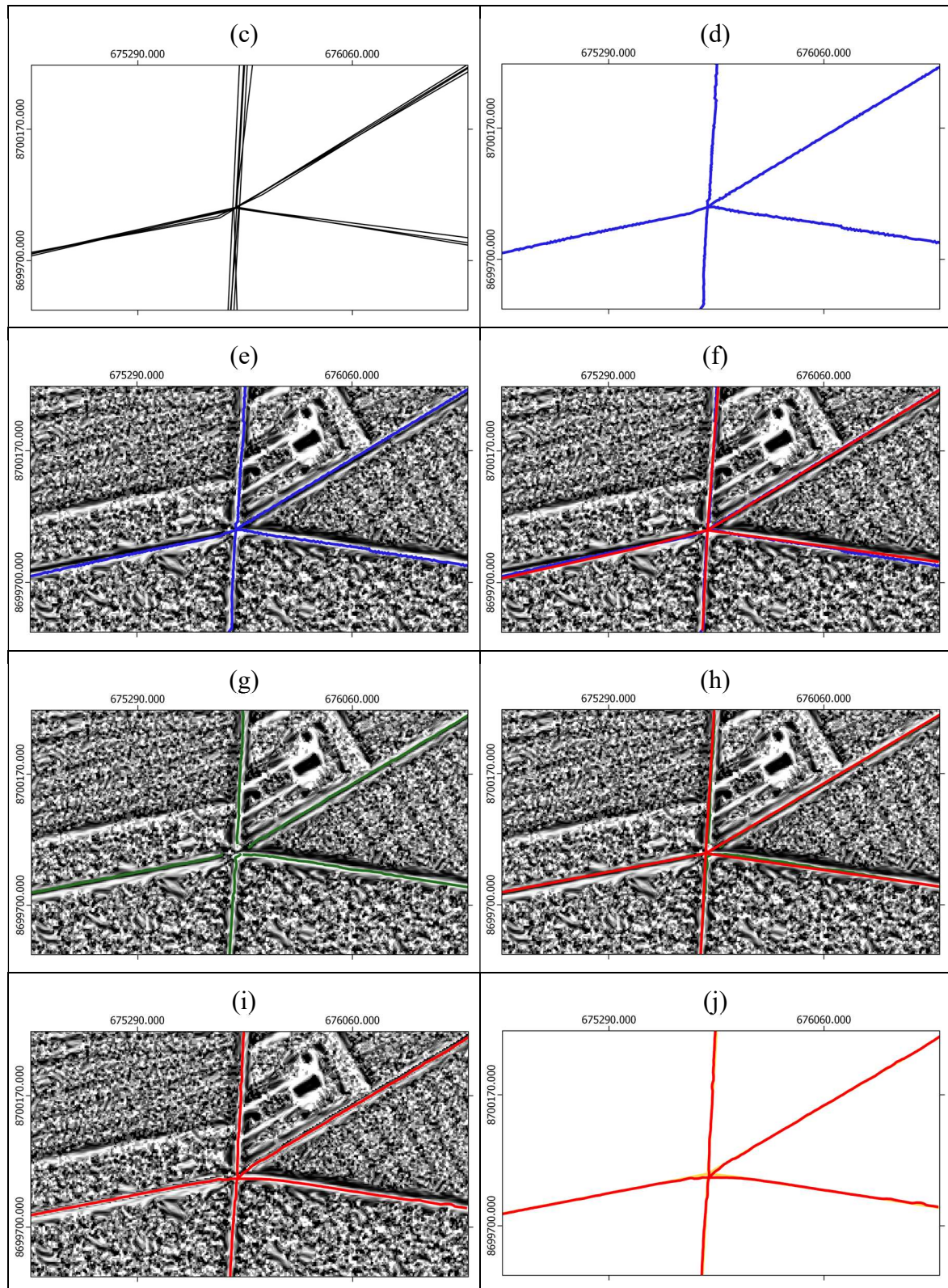


Figura 75. (a) malha IBGE sobreposta na imagem sintética (b) malha IBGE e eixo de referência; (c) trilhas GPS; (d) eixo inferido; (e) eixo inferido sobreposto na imagem sintética; (f) confluência entre a malha IBGE e eixo inferido; (g) eixo extraído na imagem sintética via *Steger*; (h) confluência entre malha expandida e eixo extraído; (i, j) resultados do refinamento via *snakes* de redes.



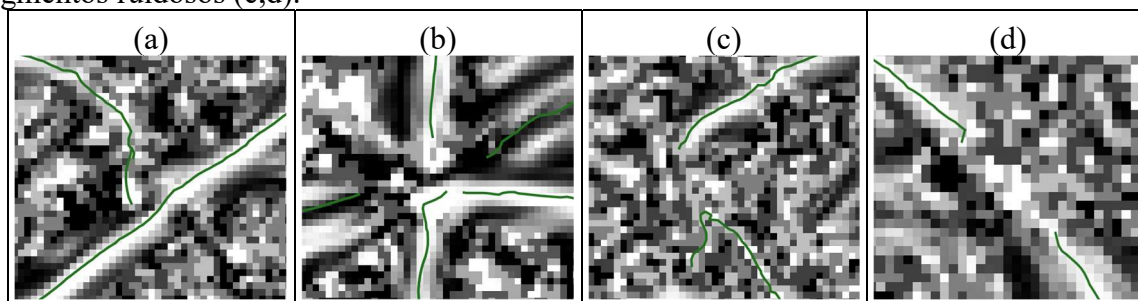


A primeira etapa do método, que procura garantir a expansão da malha, acrescentando novos ramos, atingiu seu objetivo em todos os experimentos. O sucesso desta etapa reside no fato de não haver restrições em relação a possíveis deslocamentos da região de conexão dos

novos ramos com a malha preexistente (cruzamentos), uma vez que a etapa seguinte é suficientemente robusta a ponto de corrigi-los. Assim, a prioridade desta etapa é garantir a conexão aproximada e por consequência garantir a correta topologia. Quanto ao processo de inferência de mapa de rodovia proposto, sendo mantido a relação entre a densidade das trilhas e o limiar do *buffer* descrito na subseção 3.3.1, os resultados reafirmam aqueles obtidos na subseção 4.1.1.

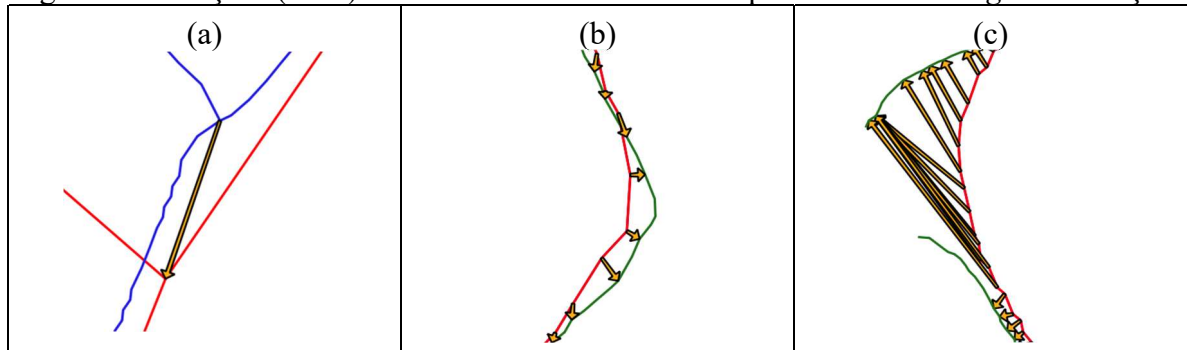
Na etapa seguinte, de ajuste da malha expandida, a imagem sintética se mostrou uma alternativa viável para a extração dos segmentos de eixos das rodovias, pois devido à sua forma de criação acaba por penalizar as feições mutáveis entre as cenas que a compõem, degradando-as de maneira que os falsos positivos gerados pelo detector de linhas de *Steger* se tornam suficientemente fragmentados a ponto de permitir uma filtragem bastante eficiente. Os segmentos de eixo obtidos via *Steger* apresentam corriqueiramente inconsistências nas regiões de cruzamento (Figura 76a,b) e em regiões lineares com ruídos (Figura 76c,d), conforme destacado por ISHIBASHI (2008). No entanto, como a topologia já está garantida pela etapa anterior, as fragmentações dos segmentos não inviabilizam o processo de conflação.

Figura 76. Resultado do detector de linhas de *Steger* em regiões de cruzamento (a,b) e segmentos ruidosos (c,d).



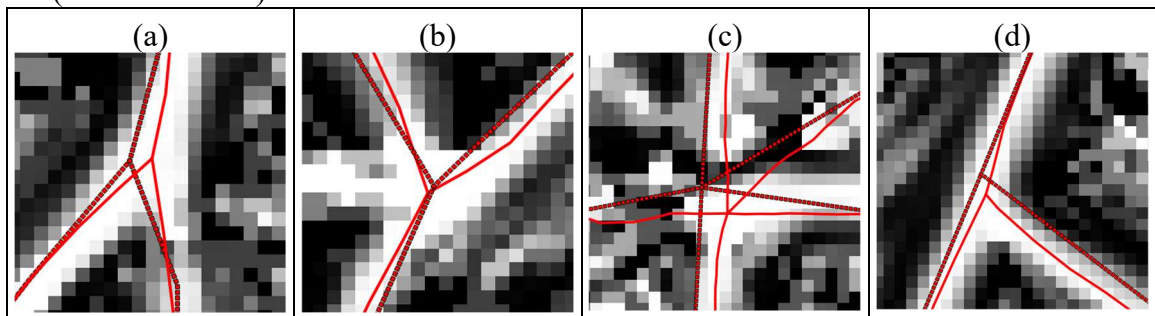
Nas duas etapas já comentadas foram realizados processos de conflação V2V, que neste caso utilizou o algoritmo *rubber-sheeting*. Este algoritmo, pelos princípios de ação, consegue alinhar de maneira eficiente os cruzamentos das vias e segmentos, encontrando relações (*links*) mesmo em trechos fragmentados (Figura 77) garantindo o ajuste das malhas. O espaço de busca para o *rubber-sheeting* foi definido em 150 m, valor que engloba o RMSE apurado para a malha IBGE na subseção 3.1.3.

Figura 77. Relações (*links*) estabelecidas entre as malhas por *rubber-sheeting* na confluência.



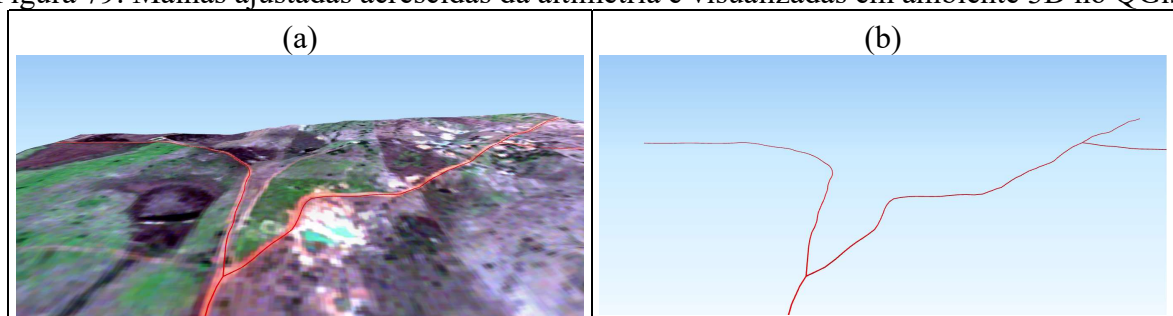
Por fim, os resultados do refino da malha ajustada via *snakes* de redes confirmaram o potencial deste algoritmo para aplicações em rodovias, fundamentalmente porque a malha de entrada estava próxima o suficiente das rodovias na imagem e a topologia íntegra. Assim, as *snakes* de rede obtiveram bons resultados, aproximando segmentos e cruzamentos de sua posição ideal (Figura 78) preservando a topologia, conforme previsto em sua teoria.

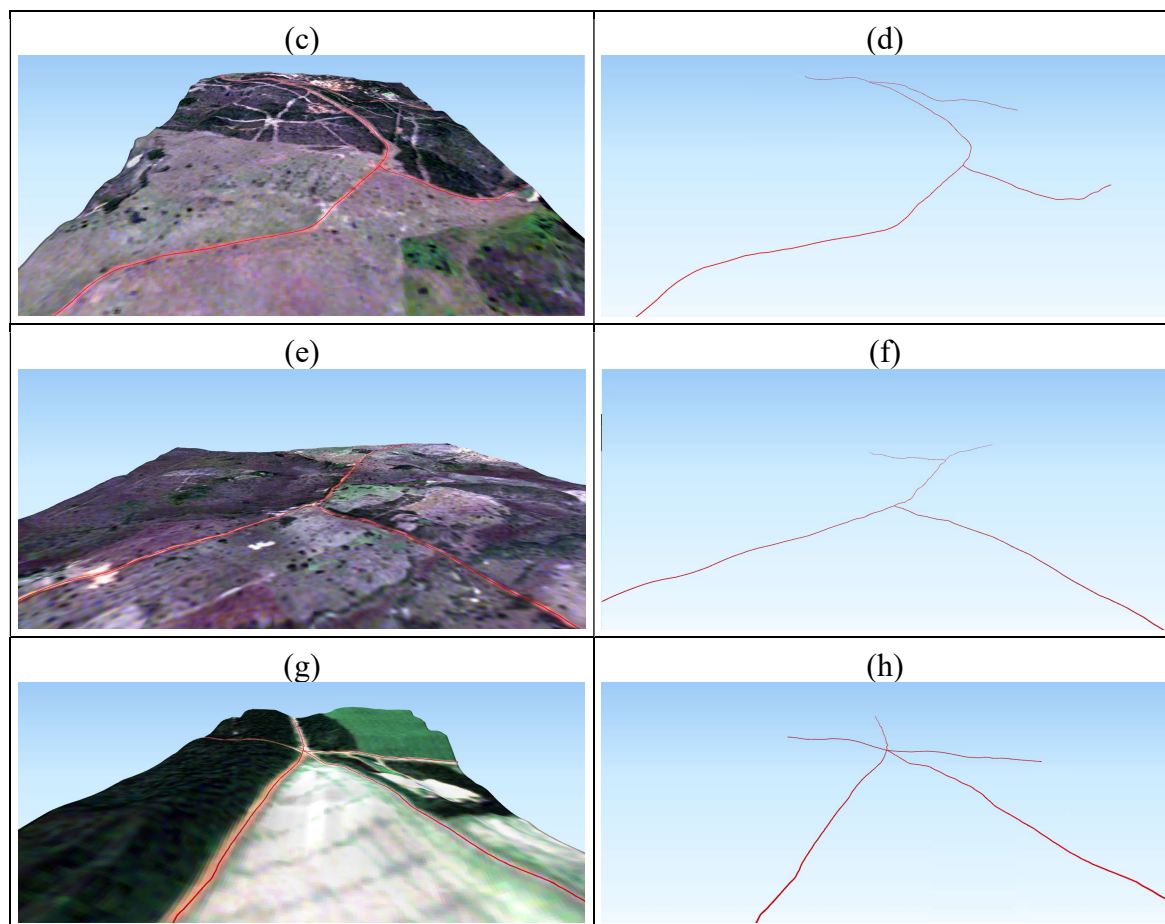
Figura 78. Eixos de entrada (vermelho escuro pontilhado) e resultado do refino por *snakes* de redes (vermelho claro).



Com a planimetria refinada, a última etapa do método é a atribuição da coordenada Z ao arquivo vetorial pela recuperação da altimetria a partir do SRTM. O arquivo vetorial de coordenadas tridimensionais (Figura 79) viabiliza cálculos mais precisos de consumo de combustível, definição de rotas otimizadas pela distância, áreas de acumulo d'água pluvial, etc.

Figura 79. Malhas ajustadas acrescidas da altimetria e visualizadas em ambiente 3D no QGis.





Foi realizada ainda uma inspeção nos atributos da malha ao final do método, sendo constatado a integridade dos padrões e das informações. É relevante salientar que o método é capaz de fornecer informações que podem ser utilizadas na atualização de 4 dos 14 atributos previstos para a *Classe Trecho Rodoviário* apresentados na subseção 2.1.3. O atributo “revestimento”, que indica o tipo de revestimento do trecho prevê as opções “Desconhecido”, “Leito Natural”, “Revestimento Primário (solto)”, “Pavimentado” e “Calçado”, podendo ser atualizado a partir da malha resultante do processo de extração dos eixos via *Steger* na etapa de ajuste da malha, cujos segmentos já se encontram com atributos advindos da imagem. Já as trajetórias GPS podem fornecer informações que ajudariam a preencher tanto o atributo “operacional”, cujas opções previstas são “sim” e “não” e indica se o trecho rodoviário está operacional; quanto o atributo “tráfego”, que pode ser “sim” e “desconhecido” e que indica se há tráfego no trecho rodoviário. O resultado final do método pode ainda responder ao atributo “Geometria Aproximada” que indica se a geometria adquirida é suficientemente próxima das vias em relação à escala prevista para o produto cartográfico e cujas as respostas possíveis são “sim” e “não”. Assim, a análise visual indica que foram atingidos os objetivos definidos em

cada etapa do método e por consequência os resultados estão de acordo com o previsto, no entanto uma análise numérica se faz necessária.

Com base na avaliação prevista na subseção 3.2.4 a análise quantitativa foi realizada para todo o conjunto de experimentos com o objetivo de mensurar as melhorias geométricas obtidas na malha após a execução do método proposto. Inicialmente foram medidos os índices de completudeza, correção, qualidade, Desvio-Padrão e RMSE para cada trecho (TR) de malha de rodovias descritas por arquivos vetoriais da base do IBGE, definindo os valores da Tabela 16.

Tabela 16. Avaliação numérica preliminar dos trechos processados.

Trechos	Completudeza (%)	Correção (%)	Qualidade (%)	RMSE (m)
TR1	4	54	4	46,17
TR2	2	27	2	56,37
TR3	3	50	3	55,44
TR4	1	50	1	42,59
TR5	5	63	5	51,04
TR6	4	66	4	53,58

Os valores do RMSE da Tabela 16, todos próximos a 50 metros, indicam que a malha inicial se encontra com um erro planimétrico em relação a malha de referência a ponto de haver somente sobreposições pontuais entre elas. Isto é confirmado pelos resultados alcançados de completudeza, que estão próximos a zero. Para verificar quais valores estes índices assumiram ao final do método, os mesmos foram recalculados, compondo a Tabela 17.

Tabela 17. Avaliação numérica dos trechos já processados.

Trechos	Completudeza (%)	Correção (%)	Qualidade (%)	RMSE (m)
TR1	82	65	57	3,70
TR2	92	60	57	4,22
TR3	95	84	81	2,62
TR4	94	82	78	2,65
TR5	88	58	54	4,89
TR6	81	60	52	4,36

É possível verificar que os resultados finais foram robustos, atingindo um RMSE médio inferior a 4 m, com uma completudeza média acima dos 85%. Estes valores confirmam as conclusões da análise visual quanto a qualidade da malha ao final do processo, porém não permitem avaliar as etapas. Assim, para verificar a contribuição dos processos intermediários foram registrados os RMSE em cada etapa, resultado nos valores da Tabela 18.

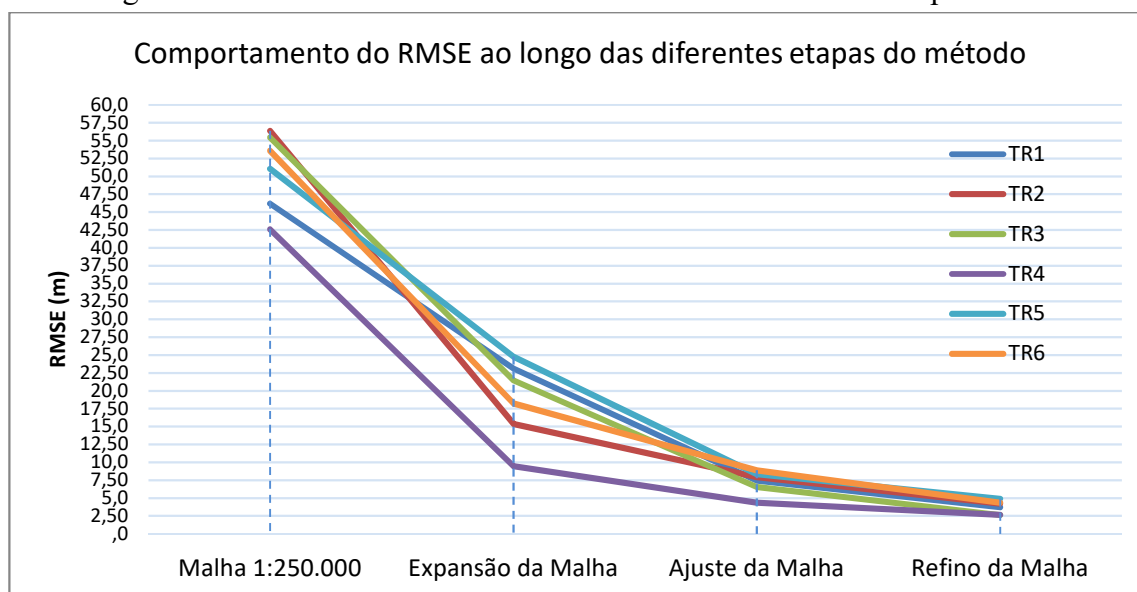
Tabela 18. RMSE apurado ao final de cada etapa do método.

Trecho	RMSE (m): Malha 1:250.000	RMSE (m): Expansão da Malha	RMSE (m): Ajuste da Malha	RMSE (m): Refino da Malha
TR1	46,17	23,13	7,44	3,70

TR2	56,37	15,36	7,95	4,22
TR3	55,44	21,43	6,53	2,62
TR4	42,59	9,47	4,34	2,65
TR5	51,04	24,77	8,35	4,89
TR6	53,58	18,21	8,87	4,36

A Figura 80 apresenta o gráfico elaborado com base na Tabela 18, que permite uma interpretação visual dos resultados numéricos.

Figura 80. Gráfico do RMSE da malha IBGE ao final de cada etapa do método.



É possível notar uma redução abrupta do RMSE na primeira etapa do método, indicando que a correspondência entre a malha preexistente e o eixo inferido já representa uma melhora posicional significativa. Estes resultados dão indícios de que para processos menos exigentes seria o suficiente a execução desta etapa (opcionalmente em um processo iterativo até o RMSE se estabilizar). No entanto, é importante salientar que não há qualquer garantia real da qualidade dos eixos inferidos a partir das trajetórias GPS, pois é diretamente dependente da qualidade das trajetórias coletadas. Ainda na etapa de expansão os valores do TR4 chamam a atenção, com uma redução do RMSE de 42,59 m para 9,47 m. Este resultado é consequência da geometria e topologia do trecho, que é composto por retas e um único cruzamento, favorecendo o processo de confluência.

Outro aspecto relevante a ser notado é que após a etapa de ajuste da malha o RMSE médio é reduzido para menos de 8 m, o que seria algo em torno de dois pixels na imagem sintética utilizada para execução das *snakes* de rede. Essas são condições ideais para a execução dos



contornos ativos paramétricos, exigindo um pequeno espaço de busca, resultando consequente num baixo RMSE final (próximo de 4 m ou 1 *pixel* da *RapidEye*), consolidando o método como uma solução robusta.

Tabela 19. Desvio Padrão da malha atualizada para enquadramento no PEC-PCD.

Identificador	$\sigma$ (m)
TR1	2,91
TR2	3,13
TR3	1,88
TR4	1,93
TR5	3,78
TR6	3,56

Assim, ao final dos experimentos os trechos atendem aos requisitos para serem classificados no PEC-PCD na escala 1:50.000, conforme proposto, estando nos padrões exigidos para inserção em bases de dados elaboradas segundo os padrões da INDE, com atributos preservados (e eventualmente atualizados) e topologia íntegra.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou um método de atualização de arquivos vetoriais que descrevam redes de rodovias em área rural, fazendo uso da integração de dados geoespaciais e *snakes* de redes, de maneira a preservar a estrutura topológica e os atributos do arquivo preexistente. O método proposto nesta pesquisa está organizado em três etapas com processos distintos e complementares.

A primeira etapa do método tem por objetivo acrescentar novos ramos à malha preexistente fazendo uso de um eixo de referência topologicamente correto, porém sem garantias quanto à sua acurácia posicional. Tal eixo de referência é obtido pelo processo proposto de inferência de mapas de rodovias a partir de trajetórias GPS, cujos resultados dos experimentos preliminares demonstraram potencial com um RMSE médio de 5,61 m. Os pontos fortes desta etapa estão relacionados ao fato do processo de inferência não exigir reconfigurações constantes de parâmetros, e ser extensível para grandes áreas, além de preservar a topologia. Já os aspectos negativos envolvem a necessidade de validação da topologia por operador humano e a incerteza em relação a verdade terrestre, tendo em vista que a qualidade dos resultados é dependente da qualidade das trajetórias utilizadas.

Já o objetivo da segunda etapa é ajustar a geometria da malha, melhorando sua acurácia posicional. Para isso um novo eixo de referência é obtido pela extração das rodovias a partir de imagens *RapidEye*, utilizando o processo proposto nesta tese. Os experimentos preliminares atingiram um RMSE médio de 7,78 m. O fato deste resultado ser inferior ao obtido na etapa anterior não o desqualifica, pois, este eixo é extraído diretamente das imagens e por consequência possui um alto grau de confiança geométrica. Os pontos fortes dessa etapa estão relacionados a proposta de uso do *subred edge* e da imagem sintética para viabilizar a extração de feições lineares a partir de imagens *RapidEye*. Também merece destaque como ponto forte o fato do processo fornecer informações para os atributos da malha, identificando se o segmento é originado de rodovia de solo exposto ou asfalto. Já o ponto fraco se refere a necessidade de reconfigurações nos parâmetros de extração (detector de linhas de Steger) para cada novo quadro da imagem, bem como a necessidade de inspeção dos resultados para remoção de fragmentos de vias decorrentes da integração entre as malhas resultantes da extração de rodovias asfaltadas e de solo exposto.

Por fim, com a malha suficientemente próxima às rodovias na imagem, as *snakes* de rede são utilizadas para refinar a geometria da malha, aumentando a acurácia posicional e

preservando a topologia. Para avaliar a contribuição das *snakes* de rede, e do método como um todo, foram realizados seis experimentos com malhas de rodovias que inicialmente possuíam um RMSE médio de 50,86 m, alcançando 18,72 m na primeira etapa do método (expansão da malha), reduzindo para 7,25 m na etapa seguinte (ajuste da malha), e para 3,74 m na etapa seguinte (refino da malha). Assim, o processo finaliza com um RMSE médio de 3,74 m e um desvio-padrão de 2,86 m, que permite o enquadramento da malha resultante no PEC-PCD 1:50.000 classe A, com topologia correta e os atributos preservados, sendo um dado adequado aos padrões da INDE.

Analisando o método completo, pode-se destacar como pontos positivos a tolerância à grandes erros posicionais do arquivo vetorial de entrada. Também merece destaque o fato de permitir que etapas intermediárias sejam refeitas sem ter que todo o processo seja reiniciado, o que permite o teste rápido de parâmetros para melhorar os resultados. Já como ponto negativo do método destaca-se a necessidade de intervenção do operador humano para validar os resultados das etapas e em caso de mudança do quadro da imagem reconfigurar os parâmetros.

Como recomendação para trabalhos futuros, destacam-se:

- Automatizar a definição dos parâmetros da inferência de mapas de rodovias;
- Estender o processo de inferência do mapa de rodovias para o espaço tridimensional, recuperando a coordenada Z de forma aproximada;
- Submeter as  $sub_{red\ edge}$  a processamentos que explorem o aspecto temporal de forma mais inteligente;
- Explorar a imagem sintética resultante da soma de  $sub_{red\ edge}$  para a extração de rodovias asfaltadas;
- Estender as *snakes* de redes para ambientes tridimensionais através de dados laser de alta qualidade.

Por fim, este método acaba por validar a hipótese motivadora desta tese e por consequência cumprir o objetivo geral proposto na pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S.; STEFANIDIS, A. Uncertainty in image-based change detection. In: accuracy 2000, **Proceedings**. Amsterdã, p. 1-8, 2000.
- AHMED, M.; KARAGIORGOU, S.; PFOSE, D.; WENK, C. Density-Based Map Construction Pipeline. In **Map Construction Algorithms**. Springer International Publishing. p. 47—55, 2015.
- ANTT, AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Anuário Estatístico do Transporte Rodoviário Interestadual e Internacional Coletivo de Passageiros 2009 - Ano base 2008**. Brasília: ANTT, 2009. Disponível em: <[http://appweb2.antt.gov.br/InformacoesTecnicas/aett/aett\\_2009/principal.asp](http://appweb2.antt.gov.br/InformacoesTecnicas/aett/aett_2009/principal.asp)>. Acesso em 20 de dezembro de 2014.
- ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; SIQUEIRA, J. C. S. Avaliação espectral e geométrica das imagens rapideye e seu potencial para o mapeamento e monitoramento agrícola e ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 105-113, 2014.
- ARSANJANI, J. J.; ZIPF, A.; MOONEY, P.; HELBICH, M. Open Stree tMap in GIScience: Experiences, Research, and Applications. **Lecture Notes in Geoinformation and Cartography**; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015, 324 p.
- BAJCSY, R., TAVAKOLI, M. Computer recognition of roads from satellite picture. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 6, p. 76 – 84, 1976.
- BANERJEE, P.; YAWALKAR, P.; RANU, S. MANTRA: A Scalable Approach to Mining Temporally Anomalous Sub-trajectories. **Proceedings of the 22Nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining**, p. 1415—1424, 2016. DOI: 10.1145/2939672.2939846.
- BARROS, R. S. CRUZ, C. B. M. Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBSR, 2007. p.1243-1250, 2007.
- BUTENUTH, M. Segmentation of Imagery Using Network Snakes. In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. XXXVI(3); p. 1–6, 2006.
- BLASBY, D.; DAVIS, M.; KIM, D.; RAMSEY, P. **GIS conflation using open source tools**. The Jump Project. 2003. Disponível em: [http://lists.jump-project.org/assets/JUMP\\_Conflation\\_Whitepaper.pdf](http://lists.jump-project.org/assets/JUMP_Conflation_Whitepaper.pdf).
- BENNER, J. G.; KARIMI, H. A. Geo-Crowdsourcing. In: **Advanced Location-Based Technologies and Services**, p. 145–164, 2013.
- BEYER, F., JARMER, T., & SIEGMANN, B. Identification of agricultural crop types in Northern Israel using multitemporal RapidEye data. In: **Journal for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science**, 1/2015, p. 21-32, 2015.

BIAGIONI J.; ERIKSSON, J. Map inference in the face of noise and disparity. In: **SIG SPATIAL 2012 International Conference on Advances in Geographic Information Systems (formerly known as GIS), SIGSPATIAL'12**, Redondo Beach, CA, USA, p. 79–88, 2012.

BIAGIONI, J.; ERIKSSON, J. Inferring road maps from GPS traces: Survey and comparative evaluation. *Transp. Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2291, Washington, p. 61-71, 2012a.

BLACKBRIDGE. **Satellite imagery product specifications**. Version 6.1. 2016. Disponível em: <<https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-Product-Specifications.pdf>>. Acesso em 13 de julho de 2016

BRADSKI, G. **The opencv library**. *Doctor Dobbs Journal* 25 (11), p. 120-126, 2000.

BRASIL. Decreto 243, 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, n. 243. 1967

BRASIL. Decreto 5.334 de 6 de janeiro de 2005. Dá nova redação ao art. 21 e revoga o art. 22 do Decreto no 89.817, de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 de janeiro de 2005.

BRASIL. Decreto 6.666, de 27 de novembro de 2008. Institui, no âmbito do Poder Executivo federal, a Infra-Estrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 de novembro de 2008. Seção 1, p. 57.

BRASIL. Decreto 7.830, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre o Sistema de Cadastro Ambiental Rural, o Cadastro Ambiental Rural, estabelece normas de caráter geral aos Programas de Regularização Ambiental. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 de outubro de 2012.

BRASIL. Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 22 de julho de 1984.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19503.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503.htm)

BRAZ, N. G. S.; MIURA, A. K. Utilização de morfologia matemática para extração de malha viária em imagens orbitais. Road Network Extraction from Satellite Images Using Mathematical Morphology. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 26.; CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 5.; EXPOSICARTA, 25., 2014, Gramado. **Mapas conectando o Brasil e a América do Sul**. Gramado: UFRGS/FAURGS, 2014.

BROX, T. **Diffusion Filtering**. in *Computer Vision A Reference Guide*. p. 210-212, 2014. 898 p.

- BUTENUTH M.; HEIPKE, C. Network snakes: graph-based object delineation with active contour models. **Machin Vision and Applications**, 23(1): p. 91-109, 2012.
- BUTENUTH, M. **Network snakes**. PhD Thesis, University of Hannover, DGK-C 620, 2008.
- BUTENUTH, M. Segmentation of Imagery Using Network Snakes. In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. vol. XXXVI(3); 2006. p. 1–6.
- BUTENUTH, M.; HEIPKE, C. Network Snakes-Supported Extraction of Field Boundaries from Imagery. In: **Kropatsch WG, Sablatnig R, Hanbury A (eds) 27th DAGM symposium**, Wien, Osterreich, LNCS, vol 3663. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 417 – 424, 2005.
- CAMBOIM, S. P.; SLUTER R. C.; MENDONÇA, A.; JORGE, M. T. E. Mapeamento sistemático: A Base para as infra-estruturas nacionais de dados espaciais. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...** 2008.
- CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. Change Detection. In: **Introduction to Remote Sensing**, Fifth Edition. Guilford Press, p. 445 - 464, 2011.
- CANTY, M. J. **Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing: With Algorithms for ENVI/IDL and Python**, Third Edition, 2014. 576p.
- CATTÉ, F.; LIONS, P.L.; MOREL, J.M.; COLL, T. **Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion**. SIAM J. Numer. Anal., 29: p.182–193., 1992.
- CHEN C.C., KNOBLOCK, C.A. Conflation of Geospatial Data, in Shashi Shekhar & Hui Xiong (eds) **Encyclopedia of GIS**, Springer, p. 129-133, 2008.
- CHEN, C.; LU, C.; HUANG, Q.; YANG, Q.; GUNOPULOS, D.; GUIBAS, L. City-Scale Map Creation and Updating Using GPS Collections. **Proceedings of the 22Nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining**. p. 1465-1474, 2016.
- CHEN, C. C.; CHIANG, M. F. Trajectory pattern mining: Exploring semantic and time information. 2016. In: **Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI)**, Hsinchu, p. 130-137, 2016.
- CHEN, C.; CHENG, Y. Roads Digital Map Generation with Multi-track GPS Data. In: **International Workshop on Education Technology and Training & International Workshop on Geoscience and Remote Sensing**, Shanghai, p. 508-511, 2008.
- CHEN, C.-C., KNOBLOCK, C.A., SHAHABI, C.: Automatically conflating road vector data with orthoimagery. **Geoinformatica**, 10(4), p. 495–530, 2006.
- CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de rodovias: relatório gerencial**. 20.ed. Brasília, 2016.
- COBB, M., CHUNG, M.J., Foley III, H., Petry, F.E., Shaw, K.B. A Rule-based Approach for the Conflation of Attributed Vector Data. **Geoinformatica**, 2(1), p. 7–35, 1998.

CONCAR. Comissão Nacional de Cartografia. Especificação Técnica para a Estruturação de **Dados Geospaciais Vetoriais (ET-EDGV v2.1)**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <[www.concar.ibge.gov.br](http://www.concar.ibge.gov.br)>. Acesso em: 09 dezembro 2014.

COTTET, G.-H.; GERMAIN, L. Image processing through reaction combined with nonlinear diffusion. **Math. Comp.**, 61: p. 659–673, 1993.

DAI, J.; DING, Z.; XU, J. Context-Based Moving Object Trajectory Uncertainty Reduction and Ranking in Road Network. **Journal of Computer Science and Technology**, v. 31, n. 1, p. 167–184, 2016.

DAL POZ, A. P.; GALLIS, R. A. B.; SILVA, J. F. C. DA; MARTINS, E. F. O. Object-Space Road Extraction in Rural Areas Using Stereoscopic Aerial Images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 4, p. 654–658, 2012. DOI: 10.1109/LGRS.2011.2177438.

DAVIES, J.J.; BERESFORD, A.R.; HOPPER, A. Scalable, distributed, real-time map generation. **IEEE Pervasive Computing archive**. V. 5(4), p. 47–54, 2006.

DELINGETTE, H., MONTAGNAT, J. Shape and topology constraints on parametric active contours. **Comput. Vis. Image Underst.** 83(2), p. 140–171, 2001.

DICKINSON, S. J., JASIOBEDZKI, P., OLOFSSON, G. AND CHRISTENSEN, H. I. Qualitative Tracking of 3-D Objects Using Active Contour Networks. In: **Proceedings Computer Vision and Pattern Recognition**, p. 812-817, 1994.

DNIT. **Manual de Terminologias Rodoviárias Usualmente Utilizadas**. Versão 1.1 de agosto de 2007, <http://www.dnit.gov.br/rodovias/rodovias-federais/terminologias-rodoviaras>

DOUCETTE, P., THEISS, H., MARSHALL, J., DOLLOFF J., LENIHAN, M., MIKHAIL, M.E., JOHANESSEN, T.E. **Measurement and Automation Practices in Photogrammetry in Manual of Photogrammetry**. Sixth Edition, American Society of Photogrammetry, 2013. 1318p.

DSG. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército. **Norma para Especificação Técnica para Produtos de Conjunto de Dados Geospaciais (ET-PCDG)**. 1a Edição, 2014.

EDELKAMP, S.; SCHRÖDL, S. Route Planning and Map Inference with Global Positioning Traces. **Computer Science in Perspective**, p. 128-151, 2003.

EGELS, Y.; KASSER, M. Digital Photogrammetry. New York: Taylor & Francis, 351p. 2002.

EL-SHEIMY, N. **Digital terrain modelling**. Calgary: Department of Geomatics Engineering of the University of Calgary, 1999.

ESRI, Environmental Systems Research Institute. **Shapefile Technical Description**, ESRI, Redlands, CA, 1998. 28p.

ESTELLÉS-AROLAS, E.; GONZÁLEZ-LADRÓN-DE-GUEVARA, F. Towards an integrated crowdsourcing definition. **J. Inf. Sci.** 38, p. 189–200, 2012.

FARR, T.G., E. CARO, R. CRIPPEN, R. DUREN, S. HENSLEY, M. KOBRICK, M. PALLER, E. RODRIGUEZ, P. ROSEN, L. ROTH, D. SEAL, S. SHAFFER, J. SHIMADA, J.

UMLAND, M. WERNER, 2007, The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, volume 45, RG2004, 2007. DOI:10.1029/2005RG000183.

FATHI, A.; KRUMM, J. Detecting road intersections from GPS traces. In: **Proceedings of 6th International Conference on Geographic Inf. Science**, p. 56–69, 2010.

FAZAN, A. J. **Extração de contornos de telhados de edifícios no espaço-objeto baseada em snakes e programação dinâmica a partir de TIN/LASER e imagens aéreas de alta resolução**. 2014. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014.

FERNANDES, V. J. M.; MARTINS, E. F. O.; DAL POZ, A. P.; IMAI, N. N. Filtragem de nuvem laser para geração de mdt por krigagem: Laser point cloud filtering for DTM generation using kriging. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 196 - 212, jan - mar, 2017. ISSN 1982-2170.

FGDC. Federal Geographic Data Committee. **Cadastral Data Content Standard for the National Spatial Data Infrastructure**. Versão 1.3, third Revision. 2003. <Disponível em: <www.fgdc.gov> Acesso em: 10 dezembro 2016.

FRÖHLICH, J.; WEICKERT, J. **Image Processing using a Wavelet Algorithm for Nonlinear Diffusion**. Report No. 104, Laboratory of Technomathematics. Kaiserslautern, Germany: University of Kaiserslautern. 1994.

FUA, P. Parametric Models are Versatile: The Case of Model Based Optimization. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXX(III/2)**, p. 828 – 833, 1995.

GALLIS, R. B. A. **Extração semi-automática da malha viária em imagens aéreas digitais de áreas rurais utilizando otimização por programação dinâmica no espaço objeto**. 2006. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

GALLIS, R. B. A.; DAL POZ, A. P.; BARBOSA, R. L.; SILVA, J. F. C. Extração Semi-Automática De Rodovias Através De Otimização Por Programação Dinâmica No Espaço Objeto: Caso Mono. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57/03, p. 168 - 179, 2005.

GARRIGOS-SIMON, F. J.; LAPIEDRA, R.; BARBERÁ, T. Social networks and Web 3.0: Their impact on the management and marketing of organizations. **Management Decision**, 50(10), p. 1880–1889, 2012.

GERKE, M.;BUSCH, A. (2005): Verification of a Digital Road Database using Ikonos Imagery: **IntArchPhRS. Band XXXVI 1/W3**. Hannover, 2005.

GIL, D.; RADEVA, P. Curvature vector flow to assure convergent deformable models for shape modelling. **Proceedings of 4th International Workshop on Energy Minimizing Methods in Computer Vision and Pattern Recognition**, p. 357–372, 2003.

GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E. **Processamento De Imagens Digitais**. 3ª Edição, São Paulo, SP, 2010. 624p.



- GOODCHILD, M. F. Citizens as sensors: The world of volunteered geography. **GeoJournal**, 69 (4), p. 211–221, 2007.
- GÖPFERT, J.; ROTTENSTEINER, F.; HEIPKE, C. Using snakes for the registration of topographic road database objects to ALS features. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 6, p. 858–87, 2011. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.08.008.
- GOPFERT, J; ROTTENSTEINER, F. Adaptation of roads to ALS data by means of network snakes: **IntAchPhRS** (38), Part 3/W8, Paris, France, p. 24-29, 2009.
- GRÜN, A.; LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes. **Photogramm. Eng. Remote Sens**, 63(8), p. 985–995, 1997.
- HADZILAKOS, T. et al. Interoperability and definition, of a national standard for geospatial data: the case of the Hellenic Cadastre. **JAG**, [S.l.], v. 2, n. 2, p.120-128, 2000.
- HARALICK, R.M.; SHAPIRO, L.G. **Computer and Robot Vision**, Addison-Wesley Publishing Company, volume I, 1992. 672 p.
- HAKLAY, M. How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. **Environment and planning. B, Planning & design** 37, p. 682-703, 2010.
- HAKLAY, M.; SINGLETON, A.; PARKER; C. Web Mapping 2.0: The Neogeography of the GeoWeb. **Geography Compass**, Vol. 2, No. 6, p. 2011-2039, 2008.
- HARVEY, F. To volunteer or to contribute locational information? Towards truth in labeling for crowdsourced geographic information. In: **Crowdsourcing Geographic Knowledge**. SUI, D., ELWOOD, S., GOODCHILD, M. (Eds) Springer Netherlands: Dordrecht, The Netherlands, p. 31–42, 2013.
- HEIPKE, C. Crowdsourcing Geospatial Data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 65, p. 550-557, 2010.
- HENRICH, V., JUNG, A., GÖTZE, C., SANDOW, C., THÜRKOW, D., GLÄBER, C. Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. In: **6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications Tel Aviv**, Israel, March 16-18, 2009.
- HIGA, L. T.; PARANHOS FILHO, A. C.; TORRES, T. G.; SALLES, A. T. Avaliação da precisão vertical do modelo SRTM para a bacia do rio Paraguai, no Estado de Mato Grosso do Sul. IN: 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. 1, 2006, Campo Grande. **Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Campo Grande: SGP, p. 834-840, 2006.
- HOWE, J. The Rise of crowdsourcing. **Wired Magazine**, 14 (6), p. 161–165, 2006.
- ISHIBASHI, R. **Extração de segmentos de rodovia em imagens de resoluções variadas usando o princípio de bordas paralelas**. 2008. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

- ISHIBASHI, R.; DAL POZ, A. P. Extração automática de segmentos lineares de rodovias em imagens de resoluções variadas. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, Curitiba, v. 15, n. 3, p. 352-372, jul-set, 2009.
- ISHIBASHI, R.; DALPOZ, A. P. . Extração automática de segmentos de rodovia via detector de linhas de Steger. In: **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 2008, Recife. II SIMGEO, 2008.
- JACOBSEN, K. SRTM Height Models. **GEOconnexion International Magazine**. July/August, 2006
- JÄHNE , B., HAUSSECKER , H. **Computer Vision and Applications: A Guide for Students and Practitioners**. Academic Press, 2000. 679p.
- JAHNE, B. **Practical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications**, Second Edition, CRC Press, Inc. Boca Raton, 2004. 610 p. ISBN: 0849319005.
- JASIOBEDZKI, P. Adaptive Adjacency Graphs. In: **Geometric Methods in Computer Vision II**. B. C. Vemuri (ed.), SPIE 2031, p. 294-303, 1993.
- JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2nd Edition. Publisher: Pearson, 2006. 608p.
- Jl, Y.; LIU, H.; LIU, X.; DING, Y.; LUO, W. A Comparison of Road-Network-Constrained Trajectory Compression Methods. In: **IEEE 22nd International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)**, Wuhan, p. 256-263, 2016.
- JOHN, T.T.R.; ARNETT, N. C.; COOPS, L. D.; DANIELS, R. W. Falls, Detecting forest damage after a low-severity fire using remote sensing at multiple scales, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Volume 35, Part B, p. 239-246, 2015. ISSN: 0303-2434.
- KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOS, D. Snakes: Active Contour Models. In: **1st International Conference on Computer Vision**, London, England, p. 259-268, 1988.
- KOLOKOUSSIS, P.; KARATHANASSI, V.; ROKOS, D.; ARGIALAS, D.; KARAGEORGIS, A. Integrating thermal and hyperspectral remote sensing for the detection of coastal springs and submarine groundwater discharges. **International journal of remote sensing**, 32 (23), p. 8231-8251, 2011.
- KOVALERCHUK, B.; DOUCETTE, P.; SEEDAHMED, G.; TAGESTAD, J.; KOVALERCHUK, S.; GRAFF, B. MapSnap system to perform vector-to-raster fusion. **SPIE Defense Security & Sensing**, Proc. SPIE, Orlando, FL, V. 8053, 2011.
- KROSS, A.; MCNAIRN, H.; LAPEN , D.; SUNOHARA, M.; CHAMPAGNE, C. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Volume 34, p. 235-248, 2015. ISSN: 0303-2434.
- KUMAR , P.; LEWIS,P. ;MCELHINNEY, C. P. ;BOGUSLAWSKI, P. ; MCCARTHY, T. Snake Energy Analysis and Result Validation for a Mobile Laser Scanning Data-Based

Automated Road Edge Extraction Algorithm. In: **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 763-773, 2017.

KUMAR, M.; SINGH, R. K.; RAJU, P. L. N.; Krishnamurthy, Y. V. N. Road Network Extraction from High Resolution Multispectral Satellite Imagery Based on Object Oriented Techniques. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume II-8, p. 107-110, 2014.

LACHAUD, J., MONTANVERT, A. Deformable meshes with automated topology changes for coarse-to-fine three-dimensional surface extraction. **Med. Image Anal**, p. 187–207, 1999.

LEBERL, F. Time for neo-photogrammetry? **GIS Development**, 14 (2), p. 22–24, 2010.

LEE, D.; YANG, W.; AHMED, N. Conflation in Geoprocessing Framework - Case Studies, **GEOProcessing 2014: The Sixth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services**, Barcelona, Espanha, p. 58 - 63, 2014.

LEE, J. G.; HAN, J.; LI, X. Trajectory outlier detection: a partition-and-detect framework. In: **Proceedings of the IEEE 24th International Conference on Data Engineering (ICDE '08)**, IEEE, Washington, DC, USA, p. 140–149, 2008.

LEE, J.; SEO, D. Crowdsourcing not all sourced by the crowd: An observation on the behavior of Wikipedia participants, **Technovation**, Volumes 55–56, p. 14-21, 2016.

LEITNER, F., CINQUIN, P.: Complex topology 3-D objects segmentation. In: Larson, R.M., Nasr, H.N. (eds). **Model-Based Vision Development and Tools**. SPIE 1609, p. 16–26, 1992.

LI, H. **Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images**. 1997. 161 f. Tese (Technical Sciences), Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 1997.

LI, Y.; Z., JINGBO; HUANG, F., LIU, L .Sub-Pixel Extraction of Laser Stripe Center Using an Improved Gray-Gravity Method. **Sensors** 2017, 17(4), p. 814, 2017. DOI: 10.3390/s17040814.

LIN, X; ZHANG, J.; LIU Z.; SHEN, J. Integration method of profile matching and template matching for road extraction from high resolution remotely sensed imagery. In: **International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications**, 2008, CD-ROM.

LIU, J. G., MASON, P J. **Image Processing and GIS for Remote Sensing: Techniques and Applications**, 2nd Edition. 2016, 472p.

LIU, X.; BIAGIONI, J.; ERIKSSON, J.; WANG, Y.; FORMAN, G.; ZHU, Y. Mining Large-Scale, Sparse GPS Traces for Map Inference: Comparison of Approaches. **HP Labs Technical Report**, HPL-2012-134, 2012.

LIU, X.; ZHAO, H.; ZHAN, G.; ZHONG, K.; LI, Z.; CHAO, Y.; SHI, Y. Rapid and automatic 3D body measurement system based on a GPU–Steger line detector. **Applied Optics**. V. 55, N. 21, p. 5539 - 5547, 2016.

- LIU, Z.; HUANG, J.; SHAO, H.-Y.; JIANG, H.-B.; PENG, B.; TIAN, L. The application of RapidEye satellite images to 1:50000 remote sensing survey for mine exploitation. **Remote Sensing for Land & Resources**, 2010.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da informação geográfica**. 3ª Edição. Porto Alegre, bookman, 2013. 540p.
- LYNCH, M.P., SAALFIELD, A.: Conflation: automated map compilation – A video game Approach. In: **Proc. Auto-Carto 7 ACSM/ASP**, Falls Church, VA, 11 Mar 1985.
- MABOUDI, M.; AMINI, J.; HAHN, M.; SAATI, M. Road Network Extraction from VHR Satellite Images Using Context Aware Object Feature Integration and Tensor Voting. **Remote Sensing**, V. 8, N 8, p. 637, 2016.
- MACHADO E SILVA, A. J. F; EDUARDO, B. F. S.; FAZAN, A. J. Avaliação da Qualidade Geométrica das Imagens RapidEye Ortoretificadas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE. Artigos, p. 1213-1220, 2013.
- MAIA, J. L. **Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.
- MAKAROVIK, B. Digital Mono-Plotters. **I.T.C. Journal**, 1, p. 101-122, 1973.
- MARCATO JUNIOR, J.; TOMMASELLI, A. M. G. Exterior orientation of CBERS-2B imagery using multi-feature control and orbital data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.79, n. 2013, p. 219-225, 2013.
- MARCATO, V. J.; DAL POZ, A.P. Extração de segmentos de contornos e cumeeiras de telhados de edifícios em imagens aéreas de alta resolução. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE, p.7867, 2011.
- MARCATO, J. J. **Fototriangulação em bloco de imagens orbitais com modelos rigorosos baseados em pontos e retas**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011.
- MARCATO, V. J.; DAL POZ, A. P. Eliminação de retas pertencentes ao terreno e redução da fragmentação das retas no processo de detecção de contornos e cumeeiras de edifícios. In: **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE**, p. 001 - 008, 2012.
- MARTINS, E. F. O.; DAL POZ, A. P.; GALLIS, R. A. B. Semiautomatic Object-Space Road Extraction Combining a Stereoscopic Image Pair and a TIN-Based DTM. In: **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, V. 12, N. 8, p. 1790-1794, 2015.
- MARTINS, E.F.O.; DAL POZ, A.P.; ZANIN, R. B. Extração semiautomática de rodovias no espaço-objeto: uso integrado de um estereopar de imagens aéreas e um mdt. **Bol. Ciênc. Geod.**, sec. Artigos, Curitiba, V. 18, n. 3, p. 446-463, jul-set, 2012.

MCINERNEY, T., TERZOPOULOS, D.: Topologically adaptable snakes. In: **Proceedings of International Conference on Computer Vision**, p. 840–845, 1995.

MENA J., MALPICA J. An automatic method for road extraction in rural and semi-urban areas starting from high resolution satellite imagery. **Pattern Recognition Letters**, V. 26, p. 1201–1220, 2005.

MENDES, S. G.; DAL POZ, A. P. DETECÇÃO DE VIAS EM IMAGENS DE INTENSIDADE DO PULSO LASER USANDO O DETECTOR DE LINHAS DE STEGER. In: **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE**, 27-30 de Julho de 2010 p. 001 - 006, 2010.

MENDES, S. G.; DAL POZ, A. P. Extração de vias combinando métodos de detecção de regiões e linhas em imagens de intensidade de pulso laser. **Pesquisas em Geociências**, 38 (3): p. 235-249, 2011.

MHANGARA, P., ODINDI, J., KLEYN, L., REMAS, H. Road extraction using object oriented classification. In: **AfricaGEO Conference**, Cape Town South Africa, 2011.

MIAO, Z.; SHI, W.; SAMAT, A.; G. LISINI; GAMBA, P. Information Fusion for Urban Road Extraction From VHR Optical Satellite Images. In: **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 1817-1829, 2016.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C. **Introduction to modern Photogrammetry**. John Wiley & Sons, 2001. 479p.

MILLER, S. Photogrammetric Products. In: MCGLONE, J.C. (ed.) **Manual of Photogrammetry**, 6 th edn, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 1318p.

MODSCHING, M.; KRAMER, R.; HAGEN K. Field trial on GPS accuracy in a medium size city: The influence of build-up. In: **3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication**, Hannover, p. 209-218, 2006.

ALI, M.; MONTZKA, C.; STADLER, A.; MENZ, G.; THONFELD, F.; VERECKEN, H. Estimation and Validation of RapidEye-Based Time-Series of Leaf Area Index for Winter Wheat in the Rur Catchment, Germany. **Remote Sens.**, 7(3), p. 2808-2831, 2015. DOI: 10.3390/rs70302808.

MUKHERJEE, M.; CHAKRAVORTI, S. Assessment of moisture diffusion distance in pressboard insulation within transformer using Fick's law. In: **Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)**, Guwahati, p; 1-4, 2014.

NASA. Shuttle Radar Topography Mission. **Mission to Map the World**. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Acesso em: 15 de novembro de 2014.

NITZBERG, M.; SHIOTA, T. Nonlinear image filtering with edge and corner enhancement. **IEEE Trans. Pattern Anal. Intell.**, 14: p. 826–833, 1992.

- O'REILLY, T. What is web 2.0: Design patterns and business models for the next generation of software. **COMMUNICATIONS & STRATEGIES**, n. 65, 1st quarter 2007, p. 17, 2007.
- PARAGIOS, N.; GOTTARDO, O.; RAMESH, V. Gradient vector flow fast geometric active contours. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence** 2004, 26, p. 402–407, 2004.
- PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. **Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. THOMSON PIONEIRA, 2008. ISBN 9788522105953. D
- PERONA, P. and MALIK, J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion. **IEEE Trans. Pattern Anal. Intell.**, 12: p. 629–639, 1990.
- PERONA, P.; MALIK, J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion. In: **Proc. IEEE Comp. Soc. Workshop on Computer Vision**, Miami Beach, Nov. 30 – Dec. 2, 1987, Washington DC: IEEE Computer Society Press., p. 16–22, 1987.
- QIU, J.; WANG, R. Road Map Inference: A Segmentation and Grouping Framework. **ISPRS Int. J. Geo-Inf.**, 5(8), p. 130, 2016. DOI:10.3390/ijgi5080130.
- QIU, M.; PI, D. Mining Frequent Trajectory Patterns in Road Network Based on Similar Trajectory. In: **Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2016: 17th International Conference**, Yangzhou, China, p. 46 - 57, 2016.
- QUAM, A. Road tracking and anomaly detection in aerial imagery. In: **DARPA Image Understanding Workshop**, p. 51-55, 1978.
- QUDDUS, A. M.; OCHIENG, Y. W.; NOLAND, B. R. Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions. **Transportation Research Part C** 15, p. 312–328, 2007.
- RAJESWARI M., GURUMURTHY K.S., PRATHAPREDDY L., OMKAR S.N. Automatic road extraction based on level set, normalized cuts and mean shift methods **Int. J. Comput. Sci.**, 8 (2), p. 250–257, 2011.
- RIGAUX, P.; SCHOLL, M. O.; VOISARD A.; KAUFMANN, M. **Spatial Databases with Application to GIS**. 2002. 410p.
- RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C.S.; BELZ, J.E.; CHAPIN, E.C.; MARTIN, J.M.; DAFFER, W. HENSLEY, S. **An assessment of the SRTM topographic products.products, Technical Report JPL D-31639**, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005. 143p.
- ROSEN, P.A., S. HENSLEY, I.R. JOUGHIN, F.K. Li, S.N. MADSEN, E. RODRIGUEZ, R.M. GOLDSTEIN, Synthetic aperture radar interferometry, **Proceedings of the IEEE**, v. 88, no. 3, p. 333-382, 2000.
- RUIZ, J.J.; ARIZA, F.J.; URENA, M. A.; BLAZQUEZ, E.B. Digital map conflation: a review of the process and a proposal for classification. **International Journal of Geographical Information Science**, V. 25, September, p. 1439–1466, 2011.

SAALFELD, A. A Fast Rubber-Sheeting Transformation Using Simplicial Coordinates, **October issue of The American Cartographer**. 1985.

SAALFELD A. Conflation: Automated map compilation, **International Journal of Geographic Information Systems**, Vol. 2(3): p. 217-228, 1988.

SAMAL, A., SETH, S., CUETO, K.: A feature-based approach to conflation of geospatial sources. **Int. J. GIS**, 18(5), p. 459–589, 2004.

SEE, L.; MOONEY, P.; FOODY, G.; BASTIN, L.; COMBER, A.; ESTIMA, J.; RUTZINGER, M. et al. Crowdsourcing, Citizen Science or Volunteered Geographic Information? The Current state of Crowdsourced Geographic Information. **ISPRS International Journal of Geo-information**, 5(5), p. 55, 2016.

SETH, S. C.; SAMAL, A. Conflation of Features. In: Shashi Shekhar & Hui Xiong (eds) **Encyclopedia of GIS**, Springer, p. 129-133, 2008.

SHAHI, K; SHAFRI, HZM; TAHERZADEH, E.; MANSOR, S.; MUNIANDY, R. A novel spectral index to automatically extract road networks from WorldView-2 satellite imagery. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, 18 (1), p. 27-33, 2015.

SHIMIZU, E.; FUSE, T. Rubber-sheeting of historical maps in GIS and its application to landscape visualization of old-time cities: focusing on Tokyo of the past. **Proceedings of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management**, 11A-3, CD-ROM, 2003.

SILVA, C. R., CENTENO, J. A. S. Determinação de larguras de estradas vicinais em imagens de alta resolução In: XIV SBSR, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. **Anais...**, p.50 - 60, 2009.

SIMONCINI, M.; SAMBO, F.; TACCARI, L.; BRAVI, L.; SALTI, S.; LORI, A. Vehicle Classification from Low Frequency GPS Data. In: **IEEE 16th International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)**, Barcelona, Spain, p. 1159-1166, 2016.

SLAMA, C. C. **Manual of Photogrammetry**, Fourth Edition, American Society of Photogrammetry, 1980. 1056p.

SONG, W. KELLER, J.M., Automated geospatial conflation of vector road maps to high resolution imagery. **Journal IEEE Transactions on Image Processing archive**, Volume 18 Issue 2, IEEE Press Piscataway, NJ, USA, p. 388-400, 2009.

STEGER, C, Subpixel – Precise Extraction of Lines and Edges. **ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam**, v. 33, Part B3, p. 141-156, 2000.

STEGER, C, Unbiased extraction of lines with parabolic and Gaussian profiles. **Comput. Vision Image Understanding**, 117, p. 97–112, 2013.

STEGER, C. An Unbiased Detector of Curvilinear Structures. **IEEE: Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Washington, v. 20, n. 2, p.62-75, 1998.

- STEGER, C. Extracting Lines Using Differential Geometry and Gaussian Smoothing; In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vienna, v. 31, Part B3, p. 821-826, 1996.
- STEGER, C. Removing the Bias from Line Detection. In: **International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, San Juan, p.116-122, 1997.
- TAO, C.V.; HU, Y.; MERCER, J.B.; SCHNICK, S.; ZHANG, Y. Image rectification using a generic sensor model – Rational Function Model, **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam 2000.
- TOUTIN, T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893-1924, 2004.
- TUNER, A. **Introduction to Neogeography**. O'Reilly Media: Sebastopol, USA, 2006, 54 p.
- USGS. Global Digital Elevation Model. **Land Processes Distributed Active Archive Center**. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov>. Acesso em: 10 de jul. 2010.
- UTTENWEILER, D.; WEBER, C.; JÄHNE, B.; FINK, R. H. A.; SCHARR, H. Spatiotemporal anisotropic diffusion filtering to improve signal-to-noise ratios and object restoration in fluorescence microscopic image sequences. **Journal of Biomedical Optics**, vol. 8, issue 1, p. 40 - 47, 2003.
- VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 2004. 72p.
- VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **TOPODATA: Processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.
- VASCONCELLOS, R. M. **GeoTIFF Uma Abordagem Resumida do Formato**. CPRM Serviço Geológico do Brasil. Dir. de Relações Institucionais e Desenvolvimento. 2002, 143p.
- VEREGIN, H.; GIORDANO, A. **Il controllo di qualità nei sistemi informativi territoriali**. Il Cardo, Venezia. 1994.
- VISVALINGAM, M.; WHYATT, J. D. The Douglas-Peucker algorithm for line simplification: re-evaluation through visualization. *Journal Computer Graphics Forum archive*, Volume 9, Issue 3, p. 213 - 228, 1990.
- WALLNER, A.; ELATAWNEH, A.; SCHNEIDER, T.; KNOKE, T. Estimation of forest structural information using RapidEye satellite data. **Forestry**, 88, p. 96 –107, 2015. DOI: 10.1093/forestry/cpu032.
- WANG, W.; YANG, N.; ZHANG, Y.; WANG, F.; Cao, T.; Eklund, P. A review of road extraction from remote sensing images. **Journal of traffic and transportation engineering**, 3 (3): p. 271-282, 2016.



- WANG, J. P.; TREITZ, M.; HOWARTH, P. J. Road network detection from SPOT imagery for updating geographical information systems in the rural-urban fringe. **International Journal of Geographical Information Systems**, 6: p. 141-157, 1992.
- WEICKERT, J. Design of Nonlinear Diffusion Filters. In: **Handbook of Computer Vision and Applications**. Bernd Jahne (Editor), Horst Haussecker (Editor), 1999. 500p.
- WEICKERT, J. Theoretical foundations of anisotropic diffusion in image processing. In: **Theoretical Foundations of Computer Vision**, Computing Suppl. 11, W. Kropatsch, R. Klette, and F. Solina, eds., p. 221–236, 1996.
- WEICKERT, J., B. TER HAAR ROMENY, L. FLORACK, J. KOENDERINK, M. VIERGEVER. A review of nonlinear diffusion filtering. *Scale-Space Theory in Computer Vision*, **Lecture Notes in Comp. Science**, Vol. 1252, pp. 3-28; Springer, Berlin; 1997.
- WEICKERT, J., V. HLAVAC, R. SARA. Multiscale texture enhancement. Computer analysis of images and patterns, **Lecture Notes in Computer Science**, V. 970, p. 230-237; Berlin; 1995.
- WEICKERT, J.: Coherence-enhancing diffusion filtering. **International Journal of Computer Vision**, V. 31, 111-127, 1999.
- WHITE, M. **The theory of geographical data conflation**. Washington, DC: Internal Bureau of the Census draft document, 1981.
- WIEDEMANN, C.; HINZ, S. Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery. In: **International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 32, 1999: CD-ROM.
- WOLF, P. R., DEWITT, B. A. Wilkinson, B. E., **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. McGraw-Hill, 4th Ed., 2014. 676p.
- XIE X.; PHILIPS, W.; AGHAJAN, H.; VEELAERT, P. Road Network Inference from GPS Traces Using DTW Algorithm. In: **Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, 17th International IEEE Conference on, p. 906-911, 2014.
- XIE, X.; MIRMEHDI, M. MAC: Magnetostatic active contour model. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence** 2008, 30, p. 632–646, 2008.
- XU, C.; PRINCE, J. L. Gradient vector flow: a new external force for snakes. In: **Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, San Juan, p. 66-71, 1997.
- Xu, C.; Prince, J. L. **Generalized gradient vector flow external forces for active contours**. **Signal Processing**, 71, p. 131–139, 1998
- YUAN S.; TAO C. Development of conflation components. In: **Proceedings of geoinformatics**. Ann Harbour, p. 1–13, 1999.
- ZANG, Y.; WANG, C.; YU, Y.; et al. Joint Enhancing Filtering for Road Network Extraction. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, VOL. 55, NO. 3, MARCH, p. 1511 - 1525, 2017.

- ZANIN, R. B.; ISHIBASHI, R.; DAL POZ, A. P. DETECTOR DE LINHA DE STEGER: POTENCIAL NA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS. In: **V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, p. 584-591, 2007. ISSN 1981-6251
- ZIEMS, M.; ROTTENSTEINER, F.; HEIPKE, C. Verification of road databases using multiple road models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 130, 44-62, 2017.
- ZHA, Y., GAO, J., NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **Int. J. Remote Sens.**, 24 (3), p. 583–594, 2003
- ZHANG, C. **Updating of Cartographic Road Databases by Image Analysis. Ph. D. Dissertation**, Report No. 79, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, 2003.
- ZHAO , L.; WANG, X. Road extraction in high resolution remote sensing images based on mathematic morphology and snake model. In: **3rd International Congress on Image and Signal Processing**, Yantai, p. 1436-1440, 2010.
- ZHENG, Y. Trajectory Data Mining: An Overview. **ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology**. v. 6, issue 3, n° 29, 2015.
- ZHENG, Y.; ZHOU, X. **Computing with spatial trajectories**. Berlin, Springer, 2011, 308p.
- ZHOU, J.; BISCHOF, W. F.; CAELLI, T. Road tracking in aerial images based on human - computer interaction and Bayesian filtering. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 61(1), p. 108- 124, 2006.
- ZILLMANN, E., SCHÖNERT, M., LILIENTHAL, H., SIEGMANN, B., JARMER, T., ROSSO, P., WEICHEL, H. Crop ground cover fraction and canopy chlorophyll content mapping using RapidEye imagery. In: **Proceedings of the 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment**, May 11-15th, Berlin, 2015.