


unesp

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

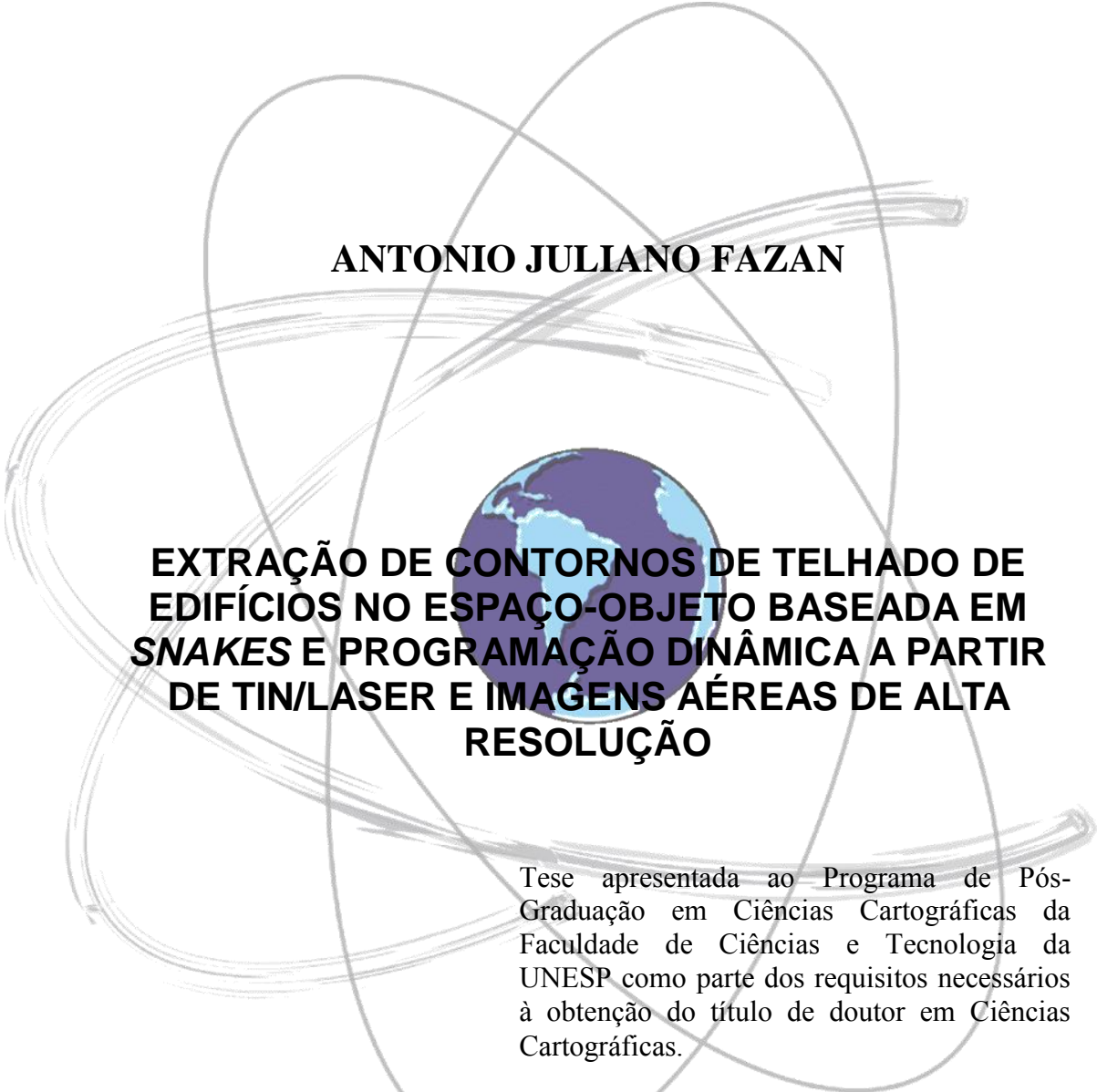
ANTONIO JULIANO FAZAN



**EXTRAÇÃO DE CONTORNOS DE TELHADO DE
EDIFÍCIOS NO ESPAÇO-OBJETO BASEADA EM
SNAKES E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA A PARTIR
DE TIN/LASER E IMAGENS AÉREAS DE ALTA
RESOLUÇÃO**

Presidente Prudente
Julho de 2014

ANTONIO JULIANO FAZAN



**EXTRAÇÃO DE CONTORNOS DE TELHADO DE
EDIFÍCIOS NO ESPAÇO-OBJETO BASEADA EM
SNAKES E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA A PARTIR
DE TIN/LASER E IMAGENS AÉREAS DE ALTA
RESOLUÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de doutor em Ciências Cartográficas.

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ
Orientador

Presidente Prudente
Julho de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

F294e Fazan, Antonio Juliano.
Extração de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto baseada em *snakes* e programação dinâmica a partir de TIN/laser e imagens aéreas de alta resolução / Antonio Juliano Fazan. - Presidente Prudente : [s.n.], 2011
114 f. : il.

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

1. Extração de edifícios. 2. Análise de imagem. 3. Visão computacional.
I. Dal Poz, Aluir Porfírio. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

BANCA EXAMINADORA




PROF. DR. **ALUIR PORFIRIO DAL POZ**
(ORIENTADOR)



PROF. DR. **EDSON APARECIDO MITISHITA**
(UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



PROF. DR. **RAUL QUEIROZ FEITOSA**
(PUC-RIO DE JANEIRO)



PROF. DR. **MAURICIO GALO**
(FCT/UNESP)



PROF. DR. **MESSIAS MENEGUETTE JUNIOR**
(FCT/UNESP)



ANTONIO JULIANO FAZAN

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 16 DE DEZEMBRO DE 2011

RESULTADO: Aprovado

DEDICATÓRIA

A meus pais, irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de pesquisa teve a colaboração direta e indireta de diversas pessoas e instituições a quem manifesto meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador Prof. Dr. Aluir Porfirio Dal Poz, pela orientação e contribuições que possibilitaram a evolução e a conclusão deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Edson A. Mitishita, Prof. Dr. Raul Queiroz Feitosa, Prof. Dr. Messias Meneguetti Jr. e Prof. Dr. Maurício Galo, pelas valiosas sugestões e colaboração dadas na defesa desta tese de doutorado.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, por toda a estrutura física disponibilizada durante a realização desta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Cartografia e Matemática da FCT/UNESP, em especial aos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, pelo ensino e formação acadêmica.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, pela amizade, apoio e incentivo ao longo de mais de 4 anos de convivência.

Aos funcionários da FCT/UNESP pelos auxílios prestados.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, por todo o suporte financeiro que possibilitou o desenvolvimento desta tese de doutorado.

Ao Prof. Dr. Edson A. Mitishita da UFPR – Universidade Federal do Paraná e ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, pelo fornecimento dos dados utilizados na avaliação experimental do método desenvolvido e apresentado neste trabalho.

EPÍGRAFE

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.
Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta um método semiautomático para a extração de contornos de telhado de edifícios descritos por estruturas retilíneas, a partir da integração de imagens aéreas de alta resolução tomadas sobre cenas urbanas complexas e dados coletados por sistemas de varredura a LASER aerotransportados. As informações tridimensionais fornecidas pelos dados de varredura a LASER e a alta definição dos contornos de telhado nas imagens aéreas de alta resolução podem ser combinadas para possibilitar a obtenção de resultados acurados e confiáveis. O método de extração proposto é formulado em termos de um problema de otimização, no qual um modelo matemático é utilizado para representar os contornos de telhado de edifícios em um referencial do espaço-objeto. A solução para o problema resultante é obtida através da técnica de otimização global por programação dinâmica e corresponde a polígonos tridimensionais representando os contornos de telhado extraídos diretamente no espaço-objeto. O modelo matemático para os contornos de telhado é inicialmente formulado no espaço-imagem, a partir de uma função de energia *snakes*, e então reformulado de modo a representar os contornos de telhado no espaço-objeto, a partir da integração dos dados de varredura a LASER estruturados na forma de uma rede irregular de triângulos (TIN). O método desenvolvido foi avaliado experimentalmente utilizando dados reais de imagens aéreas de alta resolução e dados de varredura a LASER aerotransportado. Os resultados obtidos demonstraram, em casos isolados, um certo nível de robustez do método na extração dos contornos de telhado, principalmente ao tratar com a ocorrência de detalhes espúrios nas imagens aéreas. Por outro lado, os resultados obtidos também mostram que o método é sensível à forte interação existente entre os objetos presentes em cenas tomadas sobre áreas urbanas complexas.

Palavras-chave: extração de edifícios; imagens aéreas de alta resolução; dados de varredura a LASER; TIN; *snakes*; programação dinâmica.

ABSTRACT

This research presents a semi-automatic method for rectilinear building roof contours extraction, based on the integration of high resolution aerial imagery taken from dense urban scenes and light detection and ranging (LiDAR) data. 3D information derived from LiDAR data and the high roof contour delineation accuracy in the aerial imagery can be combined in order to accurately extract the building roof contours. The proposed method is organized as an optimization problem, in which a mathematical model is used to represent the building roof contours in an object-space reference frame. The global solution for the resulting problem is found by using the dynamic programming optimization technique and corresponds to 3D polygons describing the building roof contours. The mathematical model describing a building roof contour is firstly expressed in an image-space reference frame, by using a snakes energy function, and then, the resulting snakes-based mathematical model is totally reformulated in such a way to describe building roof contours directly in an object-space reference frame, by integrating the LiDAR data represented as a triangulated irregular network (TIN) structure. An experimental evaluation of the proposed method was performed by using real high resolution aerial imagery and LiDAR data and the obtained results showed, for some cases, a certain level of robustness achieved by the method on performing the extraction task, mainly by successfully dealing with the occurrence of spurious features existing in the aerial imagery. On the other hand, many of the obtained results also demonstrated the method's sensitivity to strong interactions existing among diverse objects present in complex urban scenes.

Keywords: *building extraction; high resolution aerial imagery; LiDAR data, TIN; snakes; dynamic programming.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação geométrica de uma curva <i>snakes</i> suave.....	26
Figura 2 – Representação geométrica de uma curva <i>snakes</i> não suave.....	26
Figura 3 – Imagens sintéticas contendo feições lineares: (a) Feições lineares escuras; (b) Feições lineares claras.	27
Figura 4 – Imagem sintética contendo feições limitadas por bordas.	28
Figura 5 – Imagens reais da superfície física terrestre contendo feições limitadas por bordas: a) recorte da banda do infravermelho próximo de imagem QUICKBIRD mostrando corpo d'água em destaque; b) área de agricultura e pastagem em imagem LANDSAT ETM+ (banda 5); c) detalhe de área urbana em imagem QUICKBIRD (banda pancromática).	29
Figura 6 – Problema clássico de PD: estimação do custo mínimo para percorrer um grafo.....	37
Figura 7 – Esquema ilustrativo mostrando exemplos de oclusões ocorridas em um levantamento com um sistema aerotransportado de varredura a LASER.	40
Figura 8 – Operação de um sistema de varredura a LASER aerotransportado – Fonte: http://www.imagingnotes.com	41
Figura 9 – Representação esquemática de um modelo digital de superfície.	45
Figura 10 – Representação esquemática de um modelo digital de terreno.....	45
Figura 11 – Estrutura de grade regular representativa de um MDE.	46
Figura 12 – Estrutura de representação TIN de um MDE.	48
Figura 13 – Propriedade da <i>Triangulação de Delaunay</i>	48
Figura 14 – Interpolação de valores de elevação a partir de pontos pertencentes a uma estrutura de grade regular.	50
Figura 15 – Interpolação de valor de elevação para um ponto de uma grade regular a partir dos vértices de um triângulo pertencente a uma estrutura TIN.	50
Figura 16 – Ilustração do conceito de componentes conexos de uma imagem.	54
Figura 17 – Ilustração do conceito de componentes conexos em uma estrutura de rede irregular de triângulos.	55

Figura 18 – Fluxograma do método de extração de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto.....	56
Figura 19 – Esquema ilustrativo do conceito de energia de quinas.....	58
Figura 20 – Esquema ilustrativo do conceito de energia de desnível.....	64
Figura 21 – Pontos sementes descrevendo o contorno inicial aproximado requerido pelo método de extração.....	66
Figura 22 – Construção do espaço de busca para amostragem na imagem dos pontos candidatos à representação do contorno de telhado de edifício sendo extraído.....	67
Figura 23 – Otimização do contorno inicial através do algoritmo de PD.....	68
Figura 24 – Refinamento da primeira solução com restrição do espaço de busca.....	69
Figura 25 – Contorno final extraído para o telhado de edifício.....	70
Figura 26 – Regiões de um TIN correspondentes a telhados de edifícios.....	73
Figura 27 – Exemplo ilustrativo da definição e geração do espaço de busca de uma seção para amostragem de pontos candidatos à representação do contorno de telhado no espaço-objeto.....	75
Figura 28 – Completeza e correção entre dois objetos poligonais.....	81
Figura 29 – Contornos de telhado extraídos no espaço-objeto no experimento 1.....	85
Figura 30 – Contornos de telhado extraídos no espaço-imagem no experimento 1.....	85
Figura 31 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 1.....	87
Figura 32 – Contornos utilizados como aproximação inicial para ambos os métodos de extração.....	90
Figura 33 – Contornos de telhado de edifícios extraídos pelo método de extração no espaço-objeto.....	91
Figura 34 – Contornos de telhado de edifícios extraídos pelo método de extração no espaço-imagem.....	92
Figura 35 – Imagem de magnitude de bordas correspondentes às regiões dos contornos de telhado extraídos com destaque para áreas correspondentes a bordas causadas pela projeção de sombras.....	93
Figura 36 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 2.....	94
Figura 37 – Contornos de telhado de edifícios extraídos no experimento 3.....	96

Figura 38 – Contornos de referência utilizados na avaliação numérica dos resultados obtidos no experimento 3.	98
Figura 39 – Contornos de telhado de edificios extraídos no experimento 4.....	100
Figura 40 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 4.	101
Figura 41 – Contornos extraídos no espaço-objeto no experimento 5.	103
Figura 42 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 5.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Complementaridade entre dados de varredura a LASER e imagens aéreas na extração de edifícios – Fonte: Dal Poz (2009).	44
Tabela 2 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos contornos de telhado obtidos pelos dois métodos de extração avaliados no experimento 1.	88
Tabela 3 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 2.	94
Tabela 4 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 3.	99
Tabela 5 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 4.	102
Tabela 6 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 5.	105

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações iniciais	15
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Geral	18
1.2.2	Específicos.....	19
1.3	Estrutura da tese	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Introdução	20
2.2	Modelos deformáveis generalizados	20
2.3	Snakes	23
2.4	Programação dinâmica	34
2.5	Sistemas de varredura a LASER.....	38
2.5.1	Componentes do sistema	40
2.5.2	Processamento dos dados de varredura a LASER.....	42
2.5.3	Complementaridade entre dados fotogramétricos e de varredura a LASER.....	43
2.6	Representação de superfícies	44
2.6.1	Grades regulares	46
2.6.2	Rede irregular de triângulos – TIN.....	47
2.6.3	Interpolação de elevações.....	49
2.6.4	Coleta de dados para a produção de MDE	52

2.7	Análise de componentes conexos	54
3	METODOLOGIA	56
3.1	Introdução	56
3.2	Modelo matemático de edifícios no espaço-imagem.....	57
3.3	Modelo matemático de edifícios no espaço-objeto.....	59
3.4	Estratégia de otimização por programação dinâmica	65
3.4.1	Estratégia de otimização no espaço-imagem.....	65
3.4.2	Estratégia de otimização no espaço-objeto	70
3.4.2.1	Estratégia de separação dos telhados a partir do TIN.....	70
3.4.2.2	Estratégia de otimização para extração dos contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto.....	73
4	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL	78
4.1	Introdução	78
4.2	Procedimentos metodológicos	78
4.2.1	Características dos dados utilizados.....	78
4.2.2	Aspectos computacionais	79
4.2.3	Formas de avaliação dos resultados	79
4.2.4	Organização dos experimentos realizados	82
4.2.5	Procedimentos gerais adotados na realização dos experimentos	83
4.3	Experimentos realizados	83
4.3.1	Experimento 1	84
4.3.2	Experimento 2	88
4.3.3	Experimento 3	95
4.3.4	Experimento 4	100
4.3.5	Experimento 5	103

5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	106
5.1	Conclusões	106
5.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	109
	REFERÊNCIAS.....	110

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A extração de feições a partir de imagens digitais vem sendo alvo de investigação contínua desde a década de 1970. Este assunto é de grande interesse nas áreas de visão computacional e análise de imagens, com destaque para as aplicações relacionadas à Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. Dentro deste contexto, as abordagens tradicionais utilizam imagens coletadas por sensores instalados a bordo de plataformas aéreas e orbitais como dado de entrada principal, com o objetivo de extrair feições tais como edifícios (Lee *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2005; Sohn *et al.*, 2005; Lafarge *et al.*, 2006; Xiong e Zhang, 2006; Liu *et al.*, 2008, Guercke *et al.*, 2011) e malha viária (Gruen e Li, 1995; Agouris *et al.*, 2001; Dal Poz e Vale, 2003; Peng *et al.*, 2005, Poullis e You, 2010, Dal Poz *et al.*, 2010). Além das abordagens tradicionais baseadas em dados de imagem, as pesquisas com dados de sistemas aerotransportados de varredura a LASER também se intensificaram nos últimos anos, fato decorrente da evolução tecnológica que possibilitou o desenvolvimento e aperfeiçoamento destes sistemas, que atualmente permitem a coleta de grandes volumes de dados, com elevada acurácia planialtimétrica. Conseqüentemente, muitas aplicações surgiram nas mais diversas áreas para esses dados, principalmente no mapeamento, onde são muito atrativas as aplicações relacionadas à modelagem de superfícies e extração de feições cartográficas. Tais aplicações implicam na solução de problemas específicos envolvendo segmentação, classificação e filtragem de objetos (malha viária, edificações, vegetação etc.) para a geração de modelos digitais do terreno (MDT) e de superfície (MDS). Também têm sido bastante difundidas as abordagens que combinam dados de varredura a LASER com dados de outros sensores (imagens aéreas e de satélite) para possibilitar a extração semiautomática ou mesmo automática, de forma acurada e confiável, de objetos como edifícios e malha viária.

A pesquisa específica relacionada à extração de edifícios usando dados de varredura a LASER vem ganhando impulso nos últimos anos, fato evidenciado pela vasta literatura já produzida no assunto. Uma classificação possível para os métodos existentes é a que considera o tipo de dado de entrada (RUTZINGER *et al.*, 2006), podendo-se identificar três grupos principais: 1 – malha irregular de pontos gerados a partir do processamento dos dados originais fornecidos pelo sistema de varredura a LASER (BIOSCA e LERMA, 2008; SAMPATH e SHAN, 2010); 2 – modelos digitais de elevações (MDE), obtidos pela

regularização dessa malha irregular; 3 – combinação de dados de varredura a LASER com dados de outros sensores ou informações cartográficas pré-existentes.

A principal vantagem ao se utilizar os dados irregulares é o fato de se dispensar a utilização dos métodos de interpolação para a regularização da malha, evitando assim a inserção de erros nos modelos produzidos. Por outro lado, métodos mais complexos e sofisticados devem ser utilizados para o tratamento dos dados irregularmente distribuídos. Já o uso de grades regulares tem a vantagem de possibilitar a aplicação direta de métodos convencionais de análise de imagem. Por exemplo, Sampath e Shan (2010) utilizaram um método baseado em filtragem e segmentação topológica para extrair telhados a partir de dados de varredura a LASER. Nessa abordagem, primeiramente pontos não pertencentes a regiões planares são removidos dos dados através de uma filtragem baseada na análise de autovalores e autovetores. Em seguida, segmentos planos de telhados são extraídos com base em um algoritmo de agrupamento *fuzzy*. Ao final, os telhados são reconstruídos a partir da combinação de segmentos planos adjacentes e dos vértices, arestas e cumeeiras, determinadas através da análise das relações topológicas existentes entre esses segmentos. Outra abordagem baseada em segmentação *fuzzy* para a extração de telhados a partir de dados de varredura a LASER é apresentada em Biosca e Lerma (2008).

A combinação de dados de sistemas de varredura a LASER com outros dados, sejam estes de imagem ou obtidos a partir de bases cartográficas digitais pré-existentes, vem sendo explorada com frequência. Na sequência, alguns exemplos são apresentados. Tendo em vista a maior facilidade em se identificar vegetação em imagens multiespectrais, através de métodos como a classificação através de índices de artificialidade, Haala e Brenner (1999) combinaram esse tipo de imagem com modelos digitais de elevações derivados de dados de varredura a LASER para separar edifícios e vários tipos de vegetação. Sohn (2004) procedeu de forma semelhante para extrair edifícios. Sohn e Dowman (2001) descreveram um método automático para a extração de edifícios a partir da combinação entre imagens multiespectrais do satélite IKONOS e modelos digitais de elevações derivados de dados de varredura a LASER. Em Vosselman (2002), é encontrada uma estratégia para reconstrução de edifícios usando dados de varredura a LASER combinados com dados cartográficos em formato digital e imagens aéreas de alta resolução. Nessa estratégia, as plantas baixas dos edifícios são obtidas a partir de uma base cartográfica pré-existente e utilizadas como referência para a construção de superfícies poliedrais representando os edifícios. As bordas dos telhados são refinadas com base nas imagens aéreas.

Esta tese tem por motivação principal o aproveitamento da sinergia existente entre os dados de varredura a LASER e as imagens aéreas no contexto da extração de edifícios. Este processo se beneficia das informações tridimensionais fornecidas pelos dados de varredura a LASER e da alta definição dos contornos de telhado de edifícios nas imagens aéreas de alta resolução. O método apresentado neste trabalho foi inspirado na possibilidade de se combinar modelos digitais de superfície (na forma de estruturas TIN – *Triangulated Irregular Network*) gerados a partir de dados de varredura a LASER com imagens aéreas de alta resolução, para extrair diretamente os contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto.

Outra motivação é a inexistência da abordagem proposta na literatura referente à extração de contornos de telhado de edifícios. Alguns métodos relacionados na literatura atual têm características em comum com o apresentado neste trabalho, como a formulação e resolução do problema de extração no espaço-objeto. Embora existam poucas abordagens baseadas em *snakes* que tratam do problema de extração de contornos de telhado de edifícios, a originalidade do método proposto não está no uso combinado em si de *snakes* e programação dinâmica (PD), mas sim na forma em que ambos são integrados com modelos fotogramétricos para permitir a extração direta dos contornos de telhado no espaço-objeto.

De qualquer modo, é importante ressaltar que *snakes* e PD são conceitos amplamente explorados em aplicações envolvendo a extração da malha viária, podendo-se citar Gruen e Li (1995), Agouris *et al.* (2001), Dal Poz e Vale (2003) e Dal Poz *et al.* (2010). Entretanto, conforme mencionado anteriormente, poucas abordagens utilizando *snakes* são encontradas na literatura que trata do problema de extração de edifícios. Por exemplo, Rütther *et al.* (2002) utilizaram *snakes* tradicionais para modelar contornos de edifícios em áreas de assentamentos informais. O método de otimização empregado era o de PD, cuja inicialização baseava-se na projeção na imagem de contornos aproximados obtidos pela limiarização de um modelo digital de superfície. Guo e Yasuoka (2003) propuseram uma abordagem baseada em *snakes* para a extração de edifícios a partir da combinação de imagens IKONOS e dados de elevação. Múltiplos indicadores, derivados de ambas as fontes de dados são integrados no modelo *snakes* de modo a extrair precisamente os contornos de telhado de edifícios. Oriot (2003) apresentam um modelo estatístico de *snakes* para a extração de edifícios a partir de pares estereoscópicos de imagens aéreas. Esta abordagem separa edifícios de outras regiões a partir da segmentação de uma imagem de disparidades, que é realizada através da busca do polígono que minimiza a energia definida pelo coeficiente de correlação espacial da área de interesse. Baseado no comportamento geométrico e radiométrico dos edifícios, Peng *et al.*

(2005) modificaram o modelo *snakes* tradicional, a fim de possibilitar uma convergência mais estável para os contornos de edifícios. Ahmadi *et al.* (2010) utilizaram modelos de contorno ativo baseado em regiões para detectar e extrair contornos de telhado a partir de imagens aéreas de alta resolução. Nesta abordagem a formulação tradicional de *snakes* baseada na energia derivada de pixels da imagem é substituída por um modelo baseado em atributos obtidos a partir de regiões homogêneas da imagem.

A contribuição original deste trabalho é o desenvolvimento de um método semiautomático para a extração direta de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto. Este método é baseado na otimização de uma função objetivo (modelo matemático que representa os contornos de telhado) através da técnica de otimização global por PD. A formulação do referido modelo leva em conta a suposição básica de que os edifícios (em sua grande maioria) são descritos na imagem aérea por estruturas retilíneas, onde seus lados se interceptam em cantos formando ângulos aproximadamente retos. Estas propriedades características dos edifícios são utilizadas para a formulação de um modelo matemático representativo de seus contornos de telhado, a partir de uma função de energia *snakes* original (Kass *et al.*, 1988). O modelo resultante é modificado de modo a representar os contornos de telhado no espaço-objeto, levando em conta as relações projetivas entre os espaços imagem e objeto e uma restrição de pertinência dos contornos a um MDS em formato TIN derivado de dados de varredura a LASER. A restrição de pertinência utilizada é bastante conveniente neste caso, pois explora uma propriedade fundamental dos dados de varredura a LASER, relacionada à alta acurácia dos planos de telhados representados em um TIN. Além disso, o método proposto permite extrair o polígono ótimo para o contorno de um telhado, pois a descrição do mesmo não se limita às linhas de descontinuidade do telhado no TIN, mas utiliza informações referentes à alta qualidade geométrica de seus limites na imagem aérea para definir acuradamente seu contorno. A formulação do modelo matemático a partir de uma função de energia *snakes* permite definir o processo de extração em termos de um problema de otimização, que neste caso é solucionado através do algoritmo de PD.

1.2 *Objetivos*

1.2.1 *Geral*

Desenvolver, implementar e avaliar empiricamente um método baseado em *snakes* e PD para extrair contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto, a partir de uma

única imagem aérea de alta resolução e dados de varredura a LASER organizados na forma de uma estrutura TIN.

1.2.2 *Específicos*

Os objetivos específicos desta tese de doutorado são:

- Desenvolver um modelo matemático baseado em uma função de energia *snakes* para a representação de contornos de telhado de edifícios descritos por estruturas retilíneas e quinas se interceptando em ângulos retos no espaço-imagem;
- Estender o modelo resultante para representar contornos de telhado no espaço-objeto, tendo por base as relações projetivas entre ambos os espaços e uma restrição imposta por um modelo digital de superfície organizado na forma de uma estrutura TIN;
- Desenvolver estratégias de otimização baseadas no algoritmo de PD, de modo a obter a solução para os modelos matemáticos desenvolvidos para os dois espaços;
- Avaliar empiricamente o método de extração de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto, comparando-o com a versão desenvolvida para a extração no espaço-imagem.

1.3 *Estrutura da tese*

Esta tese está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 contextualiza o problema de extração de edifícios, define os objetivos e apresenta a contribuição original do trabalho desenvolvido. O Capítulo 2 apresenta a revisão teórica fundamental para o método proposto, que é descrito detalhadamente no Capítulo 3. O Capítulo 4 apresenta a avaliação experimental do método desenvolvido, incluindo uma breve descrição dos dados utilizados e dos aspectos computacionais envolvidos em sua implementação. Também são apresentadas as formas adotadas na análise dos resultados obtidos, bem como uma descrição detalhada de cada um dos experimentos realizados. Por fim, o Capítulo 5 traz as principais conclusões a respeito do método desenvolvido e da análise de seus resultados, além de algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Introdução*

Este capítulo apresenta o embasamento teórico fundamental para o desenvolvimento do método proposto nesta tese de doutorado. Na Seção 2.2 são apresentados os conceitos básicos para o entendimento de modelos deformáveis generalizados, a partir dos quais é derivada a formalização matemática de *snakes* (Seção 2.3). Na Seção 2.4 é apresentado o algoritmo de PD, utilizado para resolver problemas de otimização global. A Seção 2.5 traz uma breve revisão sobre os sistemas aerotransportados de varredura a LASER, com uma descrição de seus principais componentes e o processamento dos dados para a geração de modelos digitais de elevações. A Seção 2.6 trata da representação de superfícies, incluindo as formas de representação e a coleta de dados para a produção de modelos digitais de elevações. Finalmente, a Seção 2.7 apresenta conceitos fundamentais relacionados à análise de componentes conexos em imagens digitais e sua extensão para redes irregulares de triângulos. O conceito de componentes conexos de triângulos é utilizado neste trabalho como base para o desenvolvimento de uma estratégia empregada na separação de telhados de edifícios a partir de um modelo digital de superfície derivado de dados de varredura a LASER e representado através de uma rede irregular de triângulos. Os demais conceitos relacionados a este trabalho serão oportunamente referenciados no Capítulo 3, que trata do método desenvolvido nesta tese.

2.2 *Modelos deformáveis generalizados*

Um modelo deformável generalizado pode ser interpretado geometricamente como uma superfície n -dimensional constituída fisicamente por um material elástico abstrato que se deforma sob a ação de forças internas e externas atuando sobre ele (LI, 1997). As forças internas são inerentes ao modelo considerado e o campo de forças externas é obtido a partir de dados referentes ao meio onde o modelo está inserido.

Um modelo deformável generalizado com d graus de liberdade de deformação, cada qual possuindo dimensionalidade p , pode ser representado por uma função vetorial definida por (LI, 1997):

$$v(s) = [v_1(s) \quad v_2(s) \quad \dots \quad v_d(s)] \quad s \in \Omega, \quad (1)$$

onde:

- Ω é um subconjunto do espaço real de dimensionalidade p ;
- $s = (s_1, s_2, \dots, s_p)$ é um ponto em Ω ;
- $v(s)$ é uma função de mapeamento vetorial que mapeia cada ponto $s \in \Omega \subset \mathfrak{R}^p$ para o espaço \mathfrak{R}^d .

Desta forma, a função de mapeamento definida na equação 1 tem imagem no \mathfrak{R}^d , na qual cada componente é dada matematicamente por uma função paramétrica de p variáveis. O modelo deformável representado pela função $v(s)$ se estabiliza (atinge o estado de equilíbrio) quando sua energia de deformação total, dada por (LI, 1997):

$$E_q(v) = \lambda \cdot E_{int}(v) + (1 - \lambda) \cdot E_{ext}(v), \quad (2)$$

atinge um valor mínimo global.

Na equação 2, $E_{int}(v)$ representa a energia interna de deformação, $E_{ext}(v)$ a energia externa de deformação e $0 \leq \lambda \leq 1$ é o parâmetro que controla a influência relativa dos dois tipos de energia (interna e externa) atuando sobre o modelo.

A função de energia de um modelo deformável generalizado de ordem q é dada por (LI, 1997)

$$E_q(v) = \sum_{m=1}^q \sum_{j_1, \dots, j_m=1}^d \int_{\Omega} w_m(s) \left| \frac{\partial^m v(s)}{\partial s_{j_1} \partial s_{j_2} \dots \partial s_{j_m}} \right|^2 ds + \int_{\Omega} w(s) |P(v(s))| ds, \quad (3)$$

onde:

- q é uma constante positiva que denota a ordem das derivadas parciais da função $v(s)$, que por sua vez determinam a ordem de continuidade que cada componente em $v(s)$ possui;
- (j_1, j_2, \dots, j_m) é um índice múltiplo relacionado ao índice m ;

- $w_m(s)$ e $w(s)$ são funções de ponderação;
- $P(v(s))$ é uma função potencial generalizada.

O primeiro termo da função de energia $E_q(v)$ dada em 3 representa a suavidade da função de mapeamento $v(s)$. De acordo com Li (1997), as funções de ponderação $[w_1(s) \ w_2(s) \ \dots \ w_q(s)]$ são, em geral, positivas e não necessariamente contínuas. As propriedades inerentes a essas funções possibilitam introduzir, de modo seletivo, descontinuidades específicas no modelo deformável. Por exemplo, uma descontinuidade de ordem $k < q$ é definida em s_1 no limite quando $w_m(s_1) \rightarrow 0$ para $m > k$.

O primeiro e segundo termos da equação 3 representam, respectivamente, a energia interna do modelo e a energia potencial generalizada associada ao campo de forças externas aplicado sobre ele. Tais forças são derivadas dos dados e de propriedades inerentes a eles. Em termos de aproximação ótima, $P(v(s))$ é uma função penalizante, cuja tarefa é ponderar a discrepância entre a função $v(s)$ e os dados. Conforme foi mencionado anteriormente, os modelos deformáveis generalizados têm d graus de liberdade, que representam o número de direções nas quais o objeto pode se deformar. Cada grau de liberdade possui dimensão paramétrica de ordem p . Conseqüentemente, a função $v(s)$ dada na equação 1 pode ser expandida na forma:

$$v(s_1, s_2, \dots, s_p) = [v_1(s_1, s_2, \dots, s_p) \ v_2(s_1, s_2, \dots, s_p) \ \dots \ v_d(s_1, s_2, \dots, s_p)]. \quad (4)$$

Os graus de liberdade d denotam as posições (ou deslocamentos) dos pontos do modelo em um espaço euclidiano n -dimensional. Para um problema de reconstrução de superfícies, por exemplo, o modelo deformável teria $d = 1$ grau de liberdade, representando o deslocamento Z em profundidade, com $p = 2$ parâmetros referentes às coordenadas (X, Y) correspondentes ao ponto de coordenadas (X, Y, Z) no espaço tridimensional ($n = 3$) (LI, 1997).

2.3 Snakes

Provavelmente o tipo mais conhecido de modelos deformáveis generalizados é representado pelo conjunto das curvas definidas no \mathfrak{R}^2 (espaço euclidiano bidimensional) que se movem ao longo das direções x e y . Curvas deste tipo são conhecidas na literatura especializada como *snakes* (ou modelos de contorno ativo). Formalmente, *snakes* são instâncias particulares de ordem $q = 2$ (a energia interna do modelo é constituída por derivadas de primeira e segunda ordem da função $v(s)$) com dois graus de liberdade de deformação ($d = 2$) e espaço paramétrico unitário ($p = 1$) de modelos deformáveis generalizados.

As *snakes* foram inicialmente propostas por Kass *et al.* (1988) e, desde então, têm se destacado como um dos mais ativos e bem-sucedidos tópicos de pesquisa na segmentação de imagens (XU *et al.*, 2000). As *snakes* são largamente aplicadas em procedimentos como, por exemplo, detecção de fronteiras, segmentação, modelagem de formas e detecção de movimentos.

Uma curva *snakes* é representada por uma função vetorial paramétrica bidimensional dada na forma:

$$v(s) = [x(s) \quad y(s)], \quad (5)$$

na qual:

- $x(s)$ e $y(s)$ são funções paramétricas de s ;
- $s = [s] \in [a \quad b] = \Omega \subset \mathfrak{R}$ representa o intervalo no qual a função vetorial está definida e se refere ao comprimento de um arco da curva desde a origem até o ponto considerado.

Como uma *snakes* possui dimensão paramétrica unitária, q passa a denotar a ordem das derivadas totais que ocorrem na função vetorial representada pela equação 5. Deste modo, a função que representa a energia total de uma curva *snakes* é especificada a partir da equação 3 definindo-se $q = 2$ e $p = 1$, resultando na equação:

$$E_2(v) = \sum_{m=1}^2 \int_a^b w_m(s) \left| \frac{d^m}{ds^m} v(s) \right|^2 ds + E_{ext}(v), \quad (6)$$

na qual $E_{ext}(v)$ representa a energia externa da função $v(s)$, estimada a partir dos dados da imagem e considerando-se propriedades conhecidas a respeito das feições de interesse a serem extraídas a partir da imagem, sendo dada por:

$$E_{ext}(v) = \int_a^b w(s) P(v(s)) ds. \quad (7)$$

A expansão da somatória na equação 6 resulta em:

$$\begin{aligned} E_2(v) &= \int_a^b w_1(s) \left| \frac{dv(s)}{ds} \right|^2 ds + \int_a^b w_2(s) \left| \frac{d^2v(s)}{ds^2} \right|^2 ds + \int_a^b w(s) P(v(s)) ds \\ &= \int_a^b \left\{ w_1(s) \left| \frac{dv(s)}{ds} \right|^2 + w_2(s) \left| \frac{d^2v(s)}{ds^2} \right|^2 \right\} ds + \int_a^b w(s) P(v(s)) ds \end{aligned} \quad (8)$$

Considerando $x(s) = x$ e $y(s) = y$, têm-se:

$$\frac{dv(s)}{ds} = \begin{bmatrix} \frac{dx(s)}{ds} & \frac{dy(s)}{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{ds} & \frac{dy}{ds} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2v(s)}{ds^2} = \begin{bmatrix} \frac{d^2x(s)}{ds^2} & \frac{d^2y(s)}{ds^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d^2x}{ds^2} & \frac{d^2y}{ds^2} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

A partir das equações 9 e 10, é possível obter os quadrados das normas das derivadas de primeira e segunda ordem da função de energia dada em 8, ou seja,

$$\left| \frac{dv(s)}{ds} \right|^2 = \begin{bmatrix} \frac{dx}{ds} & \frac{dy}{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx}{ds} \\ \frac{dy}{ds} \end{bmatrix} = \left(\frac{dx}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dy}{ds} \right)^2 = \left[\sqrt{\left(\frac{dx}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dy}{ds} \right)^2} \right]^2, \quad (11)$$

$$\left| \frac{d^2 v(s)}{ds^2} \right|^2 = \begin{bmatrix} \frac{d^2 x}{ds^2} & \frac{d^2 y}{ds^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d^2 x}{ds^2} \\ \frac{d^2 y}{ds^2} \end{bmatrix} = \left(\frac{d^2 x}{ds^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{ds^2} \right)^2 = \left[\sqrt{\left(\frac{d^2 x}{ds^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{ds^2} \right)^2} \right]^2. \quad (12)$$

Substituindo 11 e 12 em 8, se obtém:

$$\begin{aligned} E_2(v) &= \int_a^b \left\{ w_1(s) \left[\sqrt{\left(\frac{dx}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dy}{ds} \right)^2} \right]^2 + w_2(s) \left[\sqrt{\left(\frac{d^2 x}{ds^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 y}{ds^2} \right)^2} \right]^2 \right\} ds \\ &\quad + \int_a^b w(s) P(v(s)) ds, \quad (13) \\ &= \lambda E_{\text{int}}(v) + (1 - \lambda) E_{\text{ext}}(v) \end{aligned}$$

na qual λ é o parâmetro derivado das funções de ponderação $w_1(s)$, $w_2(s)$ e $w(s)$, utilizado para controlar a influência relativa dos termos de energia interna e externa da curva. Quando $\lambda \rightarrow 1$, a solução fornecida pela equação 13 torna-se genérica e robusta a ruídos. No outro extremo, quando $\lambda \rightarrow 0$, o modelo resultante é capaz de detectar detalhes da feição de interesse a ser extraída, mas torna-se sensível a ruídos presentes na imagem. Uma notação mais usual para a equação 13 é dada por:

$$E_2(v) = \int_a^b \left[w_1(s) |v_s|^2 + w_2(s) |v_{ss}|^2 \right] ds + E_{\text{ext}}(v). \quad (14)$$

Em modelos deformáveis generalizados, as funções de ponderação $w_m(s)$ – $w_1(s)$ e $w_2(s)$ no caso de *snakes* – são utilizadas para inserir discontinuidades específicas nos modelos. No caso das *snakes*, $w_1(s)$ controla a flexibilidade e $w_2(s)$ a rigidez da curva no ponto parametrizado por s . Quando $w_1(s)/w_2(s) \rightarrow 0$, a curva *snakes* apresenta um comportamento suave, semelhante ao ilustrado pela Figura 1.

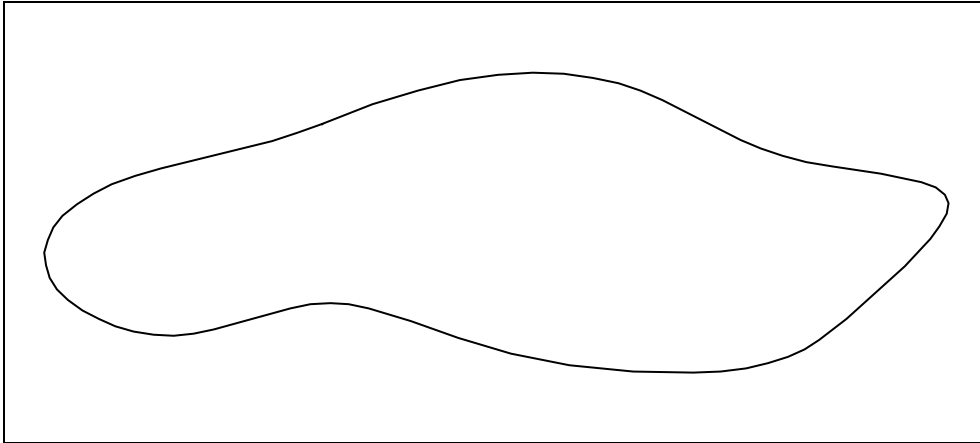


Figura 1 – Representação geométrica de uma curva *snakes* suave.

Em outro extremo, quando a razão $w_1(s)/w_2(s) \rightarrow \infty$, a curva *snakes* se comporta como aquela ilustrada na Figura 2.

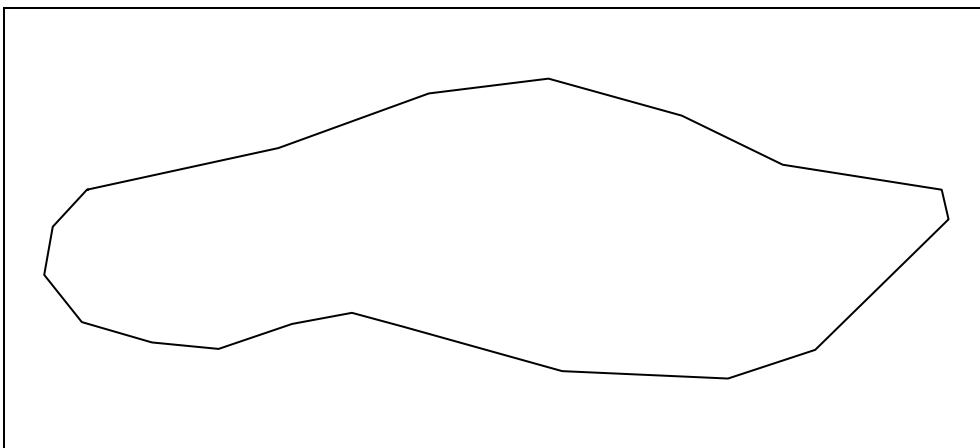


Figura 2 – Representação geométrica de uma curva *snakes* não suave.

A derivada de segunda ordem na equação 8 está associada com a curvatura da função $v(s)$. Em um caso extremo, como aquele exemplificado pela Figura 2, quando $w_2(s)$ se anula em todos os pontos s da curva, a *snakes* perde a rigidez nesses pontos e se degenera numa linha poligonal.

A energia externa de uma curva *snakes* é calculada a partir dos dados da imagem, com base em propriedades bem definidas das feições de interesse. Sua função é mover o contorno em direção à feição a ser extraída a partir da imagem. Assim, uma curva *snakes* é capaz de incorporar diferentes informações a respeito da forma dos objetos de interesse, variando de acordo com a aplicação desejada. A Figura 3 apresenta duas imagens sintéticas mostrando exemplos de feições lineares.

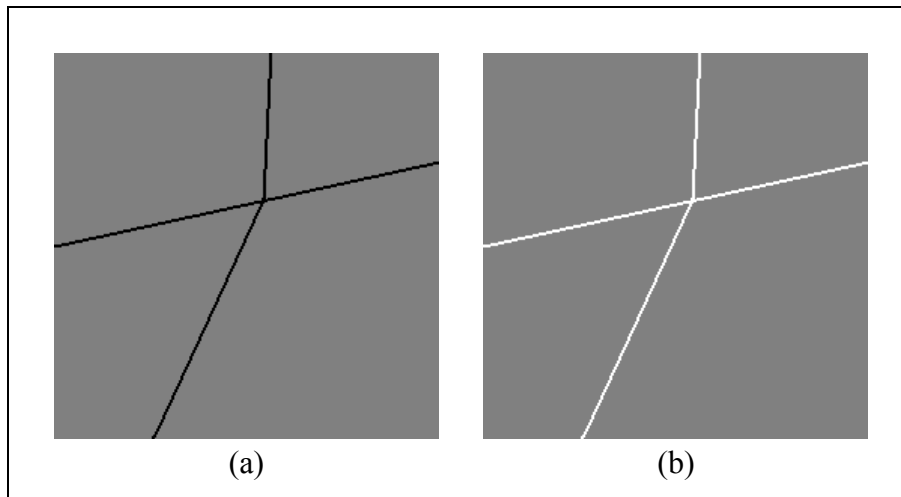


Figura 3 – Imagens sintéticas contendo feições lineares: (a) Feições lineares escuras; (b) Feições lineares claras.

Para os casos em questão, onde as feições de interesse a serem extraídas a partir da imagem são representadas por linhas, a função de energia externa da curva *snakes* pode ser dada, por exemplo, pela equação (LI, 1997):

$$E_{ext}^{linha}(v) = \int_a^b P_{linha}(v(s)) ds = \int_a^b w_{linha} G^2(x(s), y(s)) ds = w_{linha} \int_a^b G^2(x(s), y(s)) ds, \quad (15)$$

onde $P_{linha}(v(s)) = w_{linha} G^2(x(s), y(s))$ é uma função potencial de linha, na qual w_{linha} é uma constante que depende do tipo de linha a ser extraída e $G^2(x(s), y(s))$ é o quadrado dos valores de brilho dos pixels que descrevem a linha na imagem. No caso da constante w_{linha} , geralmente são utilizados valores positivos para linhas escuras (Figura 3(a)) e valores negativos para linhas claras (Figura 3(b)). Isto está relacionado ao contexto de vizinhança das linhas. Para linhas mais claras que seu entorno, a somatória dos valores de brilho de seus pixels produzirá altos valores de energia e, portanto, para que a função *snakes* seja minimizada convenientemente, é necessário utilizar valores negativos como funções de ponderação para a energia externa da função *snakes*. Para o caso de linhas escuras, o valor de energia será menor que o produzido por pontos da vizinhança e, desta forma, pode-se utilizar diretamente constantes positivas como funções de ponderação.

A Figura 4, por sua vez, apresenta uma imagem sintética mostrando exemplos de feições limitadas por bordas. As bordas em uma imagem representam regiões nas quais os elementos apresentam uma transição abrupta em seus atributos (valores de intensidade ou cor), conforme ilustrado nessa figura.

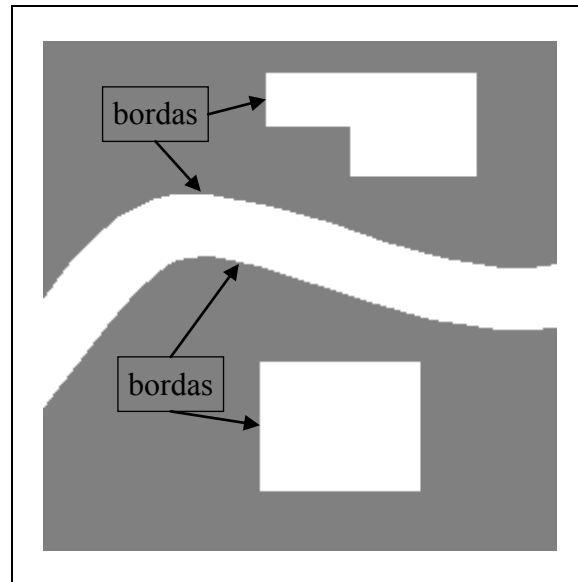


Figura 4 – Imagem sintética contendo feições limitadas por bordas.

Feições limitadas por bordas ocorrem frequentemente em imagens reais da superfície física terrestre, tanto para o caso natural (feições como corpos d'água, culturas agrícolas, matas etc.) quanto para o caso antrópico (elementos de malha viária, telhados de edifícios, quadras urbanas etc.). A Figura 5 mostra recortes de imagens contendo alguns exemplos dessas feições.

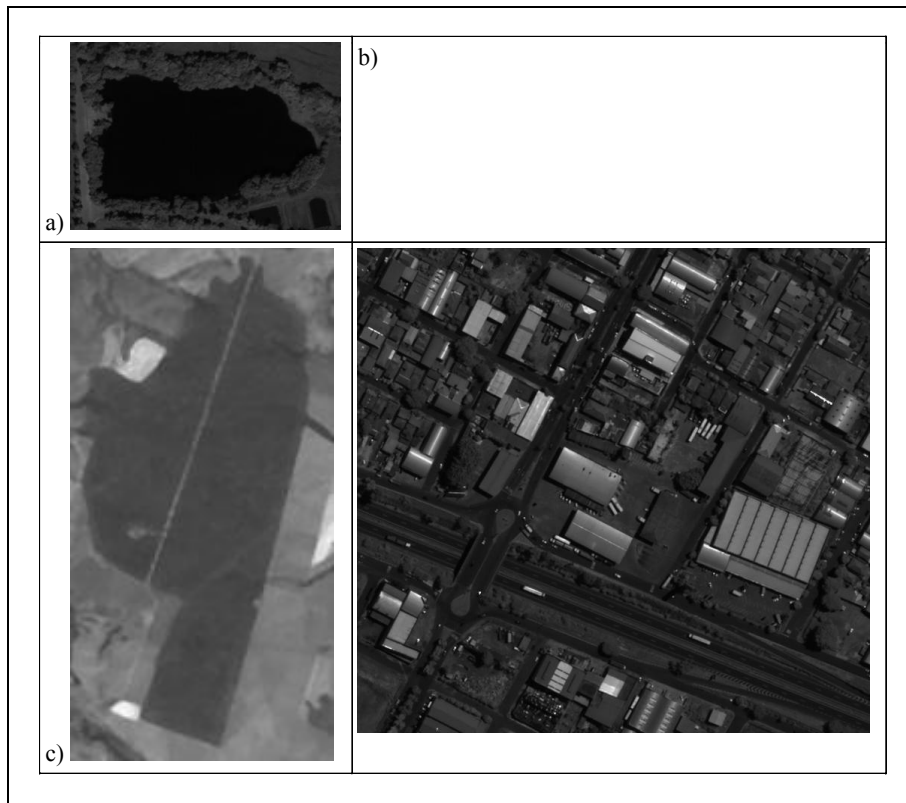


Figura 5 – Imagens reais da superfície física terrestre contendo feições limitadas por bordas: a) recorte da banda do infravermelho próximo de imagem QUICKBIRD mostrando corpo d'água em destaque; b) área de agricultura e pastagem em imagem LANDSAT ETM+ (banda 5); c) detalhe de área urbana em imagem QUICKBIRD (banda pancromática).

Nestes casos, quando as feições a serem extraídas a partir da imagem são limitadas por bordas, a função de energia externa para a curva *snakes* pode ser dada por (LI, 1997):

$$E_{ext}^{borda}(v) = \int_a^b P_{borda}(v(s)) ds = \int_a^b w_{borda} |\nabla G(x(s), y(s))|^2 ds = w_{borda} \int_a^b |\nabla G(x(s), y(s))|^2 ds \quad (16)$$

onde $P_{borda}(v(s)) = w_{borda} |\nabla G(x(s), y(s))|^2$ é uma função potencial de borda, w_{borda} é uma constante negativa e $|\nabla G(x(s), y(s))|^2$ é o quadrado da magnitude do gradiente nos pontos de borda. O mesmo pressuposto relacionado às linhas claras é válido para as funções de energia externa baseada em bordas. A somatória de magnitudes do gradiente é elevada em pontos de borda e, portanto, para se minimizar a função *snakes*, é necessário utilizar funções de ponderação negativas para sua energia externa.

A posição de uma *snakes* em uma imagem é definida por sua energia. Existe uma desvantagem principal associada com as *snakes* originalmente propostas por Kass *et al.* (1988), que diz respeito à posição inicial da curva na imagem que, por sua vez, deve ser suficientemente próxima ao contorno do objeto a ser extraído. Caso contrário, a *snakes* pode não evoluir corretamente para o contorno desejado. Isso significa que as *snakes* originais possuem raio de convergência limitado. Para resolver esse problema, diversas soluções têm sido propostas ao longo do tempo. Por exemplo, Xu e Prince (1998) propuseram a utilização de um campo de vetores gradientes como uma nova fonte de energia externa para as *snakes*. Esse campo de vetores gradientes é calculado com base nos vetores gradientes de um mapa de bordas derivado da imagem, e permite aumentar o raio de convergência. Tang *et al.* (2004) incorporaram a informação de direção do gradiente no método descrito anteriormente, a fim de possibilitar às *snakes* discernir bordas de diferentes orientações. Cheng e Foo (2006) propuseram um novo tipo de força externa de natureza dinâmica, para melhorar o desempenho das *snakes* baseadas em campos de vetores gradientes direcionais.

A condição necessária (mas em geral não suficiente) para solucionar a equação de energia *snakes* e, desta forma, extrair a feição de interesse na imagem, é dada pelas equações diferenciais parciais de *Euler-Lagrange* de 4ª ordem, cuja forma vetorial é representada por:

$$F_v - \frac{\partial}{\partial s} F_{v_s} + \frac{\partial^2}{\partial s^2} F_{v_{ss}} = 0, \quad (17)$$

sendo $F(s, v, v_s, v_{ss})$ o integrando da função de energia dada em 14, ou seja,

$$F(s, v, v_s, v_{ss}) = w_1(s) |v_s(s)|^2 + w_2(s) |v_{ss}(s)|^2 + w(s) P(v(s)). \quad (18)$$

Supondo que as funções de ponderação $w_1(s)$, $w_2(s)$ e $w(s)$ sejam dadas, respectivamente, pelas constantes α , β e κ , a equação 18 pode ser reescrita como

$$F(s, v, v_s, v_{ss}) = \alpha [x_s^2(s) + y_s^2(s)] + \beta [x_{ss}^2(s) + y_{ss}^2(s)] + \kappa P(x(s), y(s)). \quad (19)$$

Os componentes F_v , F_{v_s} e $F_{v_{ss}}$ na equação diferencial parcial de *Euler-Lagrange* são dados (omitindo-se s na representação) por:

$$F_v = \begin{bmatrix} F_x & F_y \end{bmatrix} = \left[\kappa \frac{\partial}{\partial x} P(x, y) \quad \kappa \frac{\partial}{\partial y} P(x, y) \right], \quad (20)$$

$$F_{v_s} = \begin{bmatrix} F_{x_s} & F_{y_s} \end{bmatrix} = \left[\alpha \frac{\partial}{\partial x_s} x_s^2 \quad \alpha \frac{\partial}{\partial y_s} y_s^2 \right] = [2\alpha x_s \quad 2\alpha y_s], \quad (21)$$

$$F_{v_{ss}} = \begin{bmatrix} F_{x_{ss}} & F_{y_{ss}} \end{bmatrix} = \left[\alpha \frac{\partial}{\partial x_{ss}} x_{ss}^2 \quad \alpha \frac{\partial}{\partial y_{ss}} y_{ss}^2 \right] = [2\beta x_{ss} \quad 2\beta y_{ss}]. \quad (22)$$

A substituição das equações 20, 21 e 22 na equação diferencial parcial de *Euler-Lagrange* produz uma equação diferencial vetorial de 4ª ordem, dada por:

$$\begin{bmatrix} \kappa \frac{\partial}{\partial x} P(x, y) \\ \kappa \frac{\partial}{\partial y} P(x, y) \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial s} \begin{bmatrix} 2\alpha x_s \\ 2\alpha y_s \end{bmatrix} + \frac{\partial^2}{\partial s^2} \begin{bmatrix} 2\beta x_{ss} \\ 2\beta y_{ss} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

que corresponde ao sistema de equações:

$$\begin{aligned} -2\alpha x_{ss} + 2\beta x_{ssss} + \kappa \frac{\partial}{\partial x} P(x, y) &= 0 \\ -2\alpha y_{ss} + 2\beta y_{ssss} + \kappa \frac{\partial}{\partial y} P(x, y) &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

Em uma implementação computacional, é conveniente aproximar uma curva *snakes* por uma linha poligonal composta por n vértices, de modo que:

$$v_i = v(s_i) = [x(s_i) \quad y(s_i)], \quad i = 1, \dots, n. \quad (25)$$

Desta forma, a solução da função de energia consiste em determinar os n vértices que descrevem a curva na imagem. Uma maneira conveniente de discretizar os termos da função de energia (para efeitos de implementação computacional) é aproximá-los através de diferenças finitas. Assim, a equação 14 torna-se:

$$E_2(v) = \sum_{i=1}^n \left[\alpha(s_i) |v_{i+1} - v_i|^2 + \beta(s_i) |v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1}|^2 + E_{ext}(i) \right]. \quad (26)$$

Fazendo $P_x(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} E_{ext}(x(s_i), y(s_i))$, $P_y(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} E_{ext}(x(s_i), y(s_i))$ e

utilizando diferenças finitas, a equação diferencial parcial de 4ª ordem de *Euler-Lagrange* se torna:

$$\begin{aligned} & -2[\alpha(s_{i+1})(v_{i+1} - v_i) - \alpha(s_i)(v_i - v_{i-1})] \\ & + 2 \left[\begin{aligned} & \beta(s_{i-1})(v_{i-2} - 2v_{i-1} + v_i) - 2\beta(s_i)(v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1}) + \\ & \beta(s_{i+1})(v_i - 2v_{i+1} + v_{i+2}) \end{aligned} \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

$$+ w(s_i) \left[P_x(x(s_i), y(s_i)) \quad P_y(x(s_i), y(s_i)) \right]^T = 0$$

A expansão da equação vetorial dada em 27 resulta nas equações:

$$\begin{aligned} & -2[\alpha(s_{i+1})(x_{i+1} - x_i) - \alpha(s_i)(x_i - x_{i-1})] \\ & + 2 \left[\begin{aligned} & \beta(s_{i-1})(x_{i-2} - 2x_{i-1} + x_i) - 2\beta(s_i)(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) + \\ & \beta(s_{i+1})(x_i - 2x_{i+1} + x_{i+2}) \end{aligned} \right], \end{aligned} \quad (28)$$

$$+ w(s_i) \left[P_x(x(s_i), y(s_i)) \quad P_y(x(s_i), y(s_i)) \right]^T = 0$$

$$\begin{aligned} & -2[\alpha(s_{i+1})(y_{i+1} - y_i) - \alpha(s_i)(y_i - y_{i-1})] \\ & + 2 \left[\begin{aligned} & \beta(s_{i-1})(y_{i-2} - 2y_{i-1} + y_i) - 2\beta(s_i)(y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) + \\ & \beta(s_{i+1})(y_i - 2y_{i+1} + y_{i+2}) \end{aligned} \right]. \end{aligned} \quad (29)$$

$$+ w(s_i) \left[P_x(x(s_i), y(s_i)) \quad P_y(x(s_i), y(s_i)) \right]^T = 0$$

A condição dada pelas equações diferenciais parciais de *Euler-Lagrange* deve ser satisfeita pelos n vértices da linha poligonal. As equações 28 e 29 podem ser escritas para todos os pontos na forma matricial:

$$\begin{aligned} Ax + WP_x(x, y) &= 0 \\ Ay + WP_y(x, y) &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

onde:

- W é uma matriz diagonal formada pelas funções de ponderação $w(s_i)$, ou seja,

$$W = \begin{bmatrix} w(s_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w(s_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w(s_n) \end{bmatrix}; \quad (31)$$

- $x = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$;
- $y = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n]^T$;
- $P_x(x, y) = [P_x(x_1, y_1) \ P_x(x_2, y_2) \ \cdots \ P_x(x_n, y_n)]^T$;
- $P_y(x, y) = [P_y(x_1, y_1) \ P_y(x_2, y_2) \ \cdots \ P_y(x_n, y_n)]^T$;
- A é uma matriz combinada (formada por submatrizes), dada pela equação:

$$A = -2AD^2 + 2BD^4, \quad (32)$$

na qual:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha(s_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha(s_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha(s_n) \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$B = \begin{bmatrix} \beta(s_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \beta(s_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \beta(s_n) \end{bmatrix}, \quad (34)$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

sendo

$$D^i = \begin{cases} -D^{i-1}D^T, & \forall i \text{ par} \\ D^{i-1}D, & \forall i \text{ ímpar} \end{cases} \quad (36)$$

o i -ésimo operador diferencial matricial.

A solução do sistema dado em 30 pode ser calculada iterativamente através das equações (LI, 1997):

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= (A + \gamma \cdot I)^{-1} [\gamma \cdot x_t - WP_x(x_t, y_t)] \\ y_{t+1} &= (A + \gamma \cdot I)^{-1} [\gamma \cdot y_t - WP_y(x_t, y_t)] \end{aligned} \quad (37)$$

onde t denota o número de iterações realizadas e γ é uma constante positiva usada para controlar a velocidade de convergência e estabilizar a solução. A convergência do sistema dado em 37 ocorre após $t + 1$ iterações se:

$$|v_{t+1} - v_t| < T, \quad (38)$$

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

2.4 Programação dinâmica

Conforme descreve Ballard e Brown (1982), a programação dinâmica é uma técnica de otimização para a solução de problemas onde nem todas as variáveis do modelo funcional estão simultaneamente inter-relacionadas. A programação dinâmica consiste em uma estratégia para solucionar problemas de otimização que envolve um processo de tomada de decisões sequenciais (ou de múltiplos estágios), expresso como um algoritmo de busca recursiva, que implica na definição de um espaço de busca.

A extração de feições a partir de imagens digitais pode ser formulada em termos de um problema de otimização, que por sua vez pode ser solucionado através da utilização do algoritmo de PD. Desta forma, para aumentar a eficiência do método, é necessário definir e implementar um modelo matemático genérico para representar a feição de interesse e, conseqüentemente, reduzir o espaço de busca. Tal modelo pode ser formulado levando-se em conta propriedades contextuais dos objetos (feições), conforme descrito por Rüter *et al.* (2002).

A solução para um problema de otimização do tipo:

$$\max_{x_i} h(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad (39)$$

somente pode ser obtida através de um processo de busca exaustiva (análise de todas as combinações possíveis) das variáveis x_i envolvidas. Entretanto, se a função h dada em 39 for expressa como uma combinação de funções, como, por exemplo,

$$h(x_1, x_2, x_3, x_4) = h_1(x_1, x_2) + h_2(x_2, x_3) + h_3(x_3, x_4), \quad (40)$$

então a solução para h pode ser eficientemente obtida através do algoritmo de PD.

Como x_1 depende apenas de x_2 em h_1 na equação 40, para maximizar x_1 deve-se calcular a função:

$$f_1(x_2) = \max_{x_1} h_1(x_1, x_2) \quad (41)$$

e armazenar, para cada valor de x_2 , os melhores (máximos) valores de $h_1(x_1, x_2)$ em uma tabela. Como h_2 e h_3 não dependem de x_1 , esta variável é eliminada da análise nesta etapa.

As próximas etapas para a obtenção da solução consistem em eliminar as variáveis x_2 e x_3 , calculando-se as funções:

$$f_2(x_3) = \max_{x_2} [f_1(x_2) + h_2(x_2, x_3)], \quad (42)$$

$$f_3(x_4) = \max_{x_3} [f_2(x_3) + h_3(x_3, x_4)], \quad (43)$$

e armazenando, para cada valor de x_3 e x_4 , respectivamente, os melhores (máximos) valores das funções f_2 e f_3 em tabelas, do mesmo modo como foi realizado na etapa inicial. A solução final é obtida por:

$$\max_{x_i} h = \max_{x_4} f_3(x_4), \quad (44)$$

o que corresponde a percorrer as tabelas geradas durante o processamento do algoritmo a partir da última até a primeira. Um exemplo prático elucidativo é apresentado em Ballard e Brown (1982).

O modelo generalizado para n variáveis, quando $f_0(x_1) = 0$, é dado por (BALLARD e BROWN, 1982):

$$\begin{aligned} f_{n-1}(x_n) &= \max_{x_{n-1}} [f_{n-2}(x_{n-1}) + h_{n-1}(x_{n-1}, x_n)] \\ \max_{x_i} h(x_i, \dots, x_n) &= \max_{x_n} f_{n-1}(x_n) \end{aligned} \quad (45)$$

O algoritmo de PD também pode ser utilizado para problemas de minimização, bastando para tanto substituir o operador $\max[\cdot]$ pelo operador $\min[\cdot]$ na formulação dada na equação 45.

Um exemplo de como o algoritmo de PD aumenta a eficiência na busca pela solução de um problema de otimização é apresentado em Ballard e Brown (1982): se cada variável admite 20 valores discretos em um modelo com estrutura semelhante à dada pela equação 45, para calcular $\max_{x_n} f_{n-1}(x_n)$ devem ser avaliadas 20 combinações diferentes para x_{n-1} e x_n , de modo que o esforço computacional total equivale à realização de $(n-1) \times 20^2 + 20$ operações. No caso do algoritmo de busca exaustiva, são realizadas 20^n operações. Consequentemente, para solucionar uma função de $n=4$ variáveis, serão realizadas 1.220 e 160.000 operações pelos algoritmos de PD e de busca exaustiva, respectivamente.

De acordo com Gruen e Li (1995), o algoritmo de PD possui as seguintes propriedades:

- **Estabilidade numérica:** O algoritmo é numericamente estável, o que significa que o valor global ótimo é sempre alcançado dentro do espaço de busca definido pelo algoritmo;
- **Garantia de otimização:** A otimização do problema considerado é sempre garantida, uma vez que todas as possíveis combinações de valores das variáveis envolvidas são analisadas pelo algoritmo;
- **Execução direta:** O processamento é realizado sequencialmente uma única vez (procedimento não iterativo);

- **Flexibilidade:** O algoritmo permite a imposição de restrições para obter a solução do problema de otimização. Por exemplo, é possível impor uma restrição de modo a fazer com que a distância entre duas variáveis consecutivas x_k e x_{k+1} seja maior que um valor d pré-estabelecido, ou seja,

$$|x_k - x_{k+1}| > d. \quad (46)$$

Se um valor viola a restrição funcional imposta por 46, é eliminado da análise e o próximo valor atendendo à restrição é escolhido.

Um problema clássico de PD também pode ser formulado em termos de um procedimento de busca em um grafo, como aquele ilustrado pela Figura 6. O objetivo principal é encontrar o caminho ótimo entre os nós A e N do grafo, cuja solução pode ser obtida sequencialmente. No primeiro estágio, é necessário escolher um dos caminhos entre o nó A e os nós 10 e 11. Supondo que o nó 11 seja a melhor escolha, a próxima decisão deve ser tomada entre os nós 21, 22 e 23. Esta estratégia é sequencialmente repetida até que o nó N seja alcançado. O caminho definido pelos nós A, 11, 22, 31 e N é o caminho ótimo procurado, correspondendo à trajetória de custo mínimo (DAL POZ, 2003).

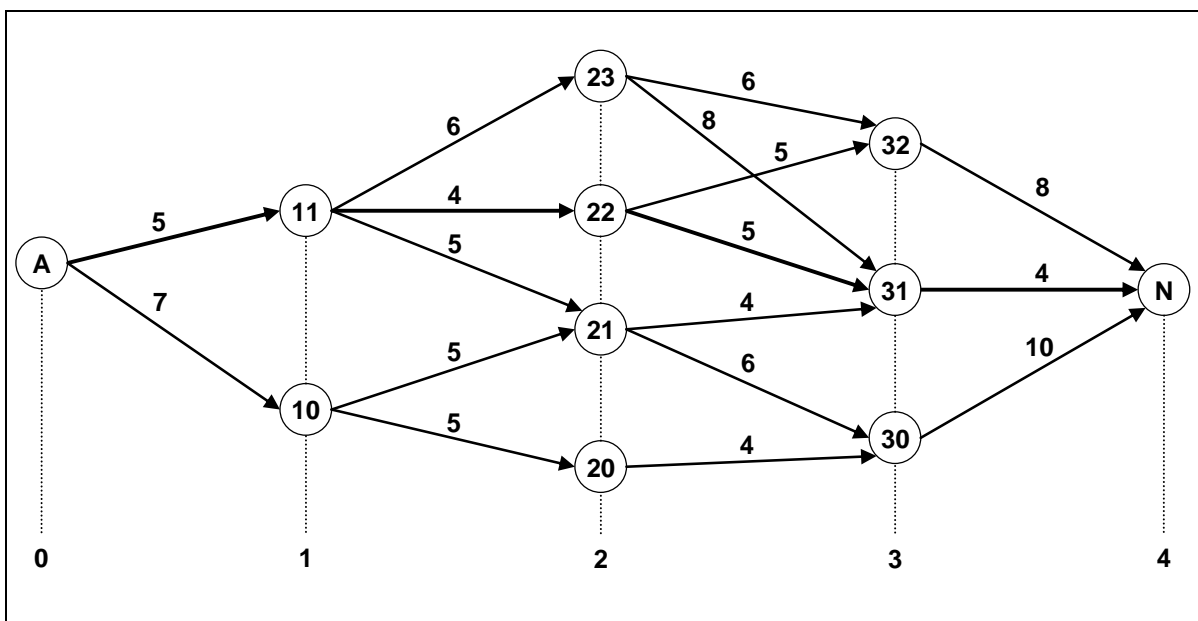


Figura 6 – Problema clássico de PD: estimação do custo mínimo para percorrer um grafo.

Li (1997) define esse procedimento de maneira formal. Seja $\{P_i\}$, $i = 1, \dots, n$ um conjunto de nós e $[C_{ij}]$ uma matriz custo, na qual o elemento C_{ij} representa o custo para

se deslocar do nó P_i ao nó P_j . O caminho ótimo é tal que o custo para se deslocar do nó inicial P_A para o nó final P_N seja mínimo. Sejam agora a função $g(i, j)$ que descreve o custo para se mover do nó P_i para o nó P_j e s os nós intermediários ao longo do caminho. Assim, pode-se escrever a equação:

$$g(i, j) = \min_s [g(i, s) + g(s, j)]. \quad (47)$$

A solução da equação 47 corresponde ao conjunto s de nós que representam a trajetória de custo mínimo entre os nós P_i e P_j e pode ser eficientemente obtida através de um procedimento de otimização sequencial como o algoritmo de PD (DAL POZ, 2003).

2.5 *Sistemas de varredura a LASER*

O desenvolvimento tecnológico constante tem possibilitado o surgimento de modernos sistemas para a coleta de dados destinados ao mapeamento direto da superfície terrestre. Um exemplo são os sistemas aerotransportados de varredura a LASER, que se constituem em uma inovação tecnológica relativamente recente para a coleta de dados destinados ao mapeamento topográfico e são derivados dos antigos perfiladores a LASER.

Os perfiladores a LASER geravam durante o levantamento uma única linha de pontos de elevação abaixo da aeronave em cada faixa de voo. Suas aplicações eram limitadas devido à baixa quantidade de dados produzida e à precisão limitada dos sensores de posicionamento e orientação integrados a eles (MIKHAIL *et al.*, 2001). Avanços tecnológicos possibilitaram a integração de varredores a LASER com modernos sensores de posicionamento e orientação, como GNSS (sistemas globais de posicionamento e navegação baseados em satélites) e sistemas de navegação inercial, de modo a garantir alta acurácia para os pontos levantados, o que culminou no desenvolvimento dos atuais sistemas aerotransportados de varredura a LASER.

O princípio de funcionamento destes sistemas é bastante simples: à medida que a aeronave voa ao longo de sua trajetória, o sistema emite pulsos LASER, que são direcionados para a superfície terrestre, e registra a intensidade e o tempo de retorno dos ecos recebidos. Os dados coletados durante o levantamento são processados conjuntamente, resultando em uma malha irregular de pontos de elevação, que é utilizada principalmente para a geração de modelos digitais de elevações (MDE), através da interpolação da malha para

uma grade regular de pontos ou de sua organização na forma de uma estrutura composta por uma rede irregular de triângulos.

Uma das principais vantagens dos sistemas de varredura a LASER é que estes são capazes de fornecer uma grande quantidade de dados com elevada acurácia planialtimétrica, ao mesmo tempo cobrindo grandes áreas em curtos intervalos de tempo. Além disso, por se tratarem de sensores ativos, podem operar tanto durante o dia quanto à noite. Entretanto, para o mapeamento de grandes áreas, é necessário combinar um grande número de faixas de voo, uma vez que a largura da faixa é limitada por fatores como a altura de voo e o ângulo de varredura do sistema. Outra característica dos dados produzidos por esses sistemas, comum também às imagens tomadas a partir de sensores ópticos de visada central, é a ocorrência de oclusões em regiões de relevo muito acidentado ou em áreas urbanas com muitos edifícios altos. Neste caso, regiões adjacentes a estes objetos não são irradiadas pelos feixes LASER, e conseqüentemente, os pontos de elevação necessários para a modelagem de suas superfícies não podem ser obtidos diretamente através dos dados coletados durante a varredura. Entretanto, esses pontos podem ser obtidos indiretamente, através de interpolações realizadas a partir de pontos vizinhos. A Figura 7 ilustra a ocorrência de oclusões durante a varredura a LASER em uma área urbana contendo edifícios altos. Além dos fatores já mencionados, essas ocorrências dependem do padrão de varredura utilizado pelo sistema.

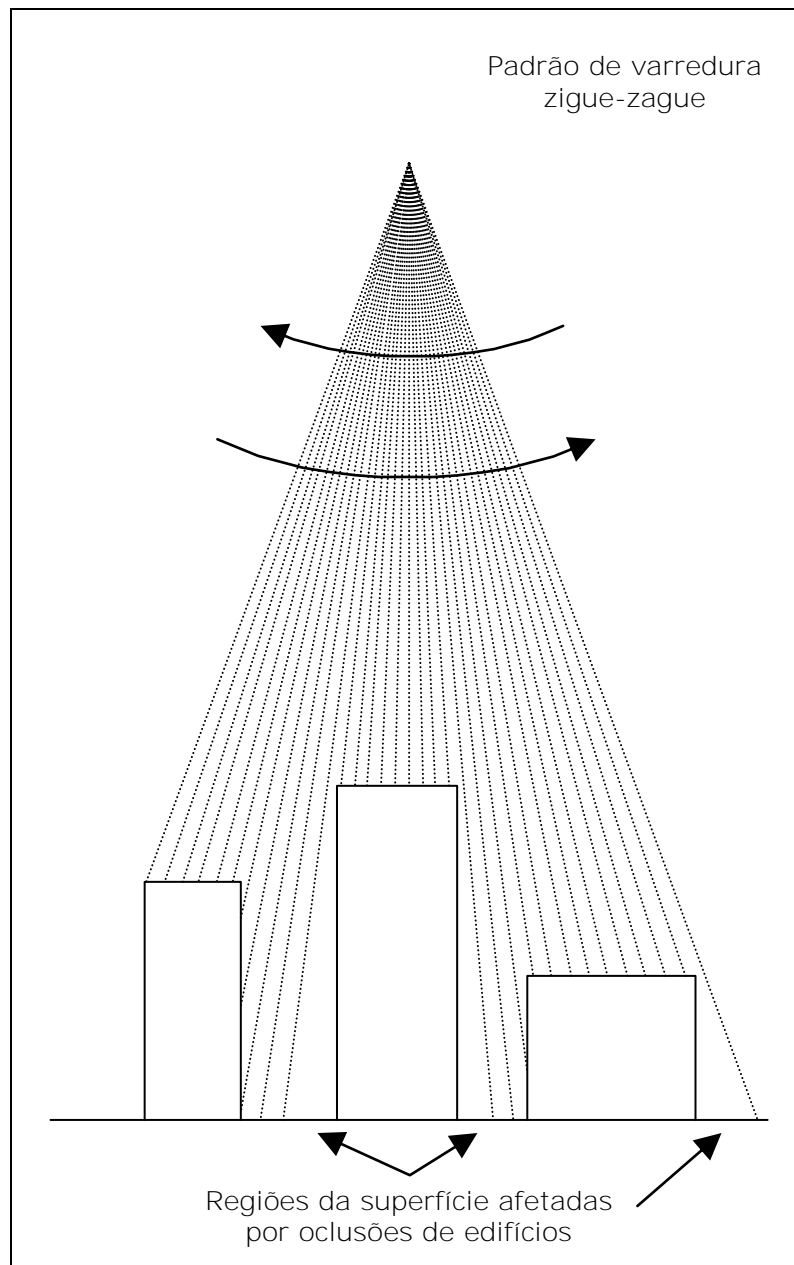


Figura 7 – Esquema ilustrativo mostrando exemplos de oclusões ocorridas em um levantamento com um sistema aerotransportado de varredura a LASER.

2.5.1 Componentes do sistema

A Figura 8 exemplifica a operação de um sistema aerotransportado de varredura a LASER. Os principais componentes deste sistema são (MIKHAIL *et al.*, 2001):

- Emissor de feixes LASER;
- Mecanismo de varredura e sistema de projeção;
- Receptor eletro-óptico;
- Sistemas de posicionamento e orientação.

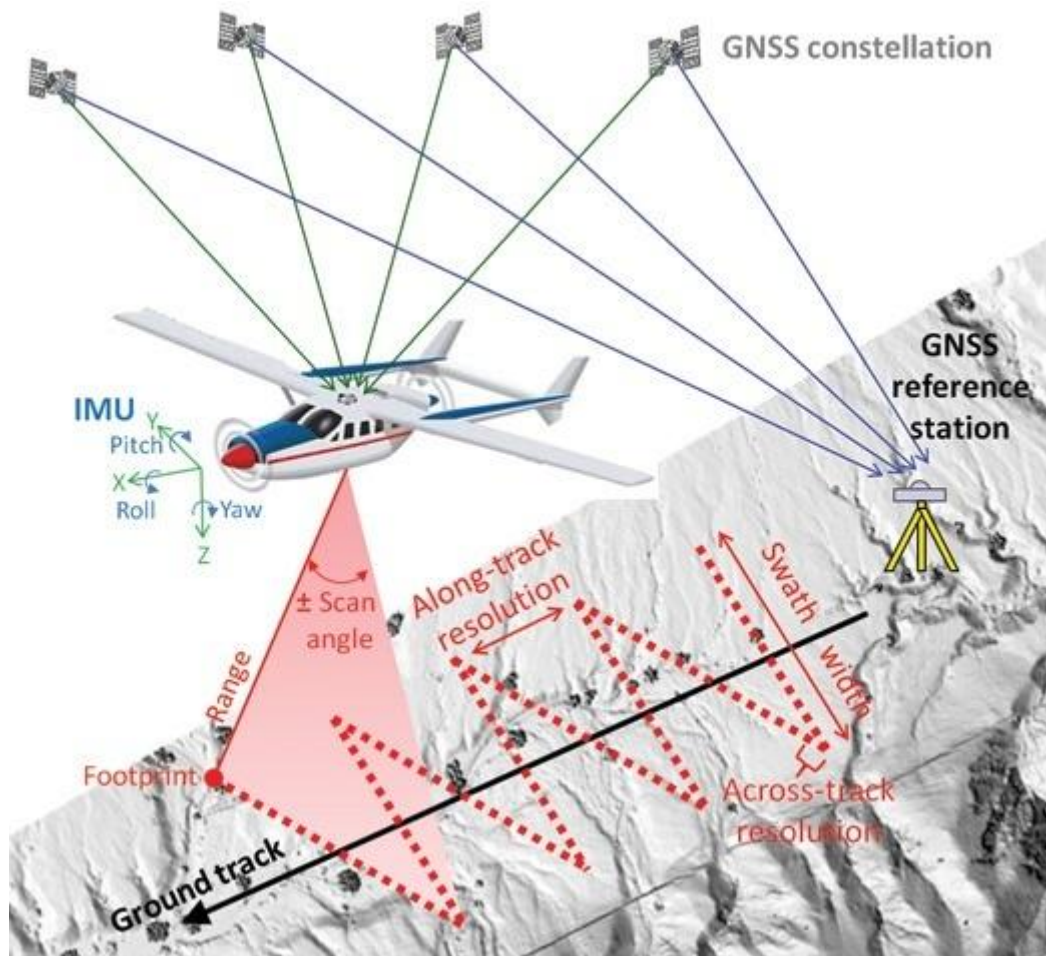


Figura 8 – Operação de um sistema de varredura a LASER aerotransportado – Fonte: <http://www.imagingnotes.com>.

O **emissor de feixes LASER** é o principal componente do sistema. Sua função é gerar pulsos LASER (feixes LASER de curtíssima duração – cerca de 10ns) em uma frequência muito elevada (MIKHAIL *et al.*, 2001).

O **mecanismo de varredura e sistema de projeção** é composto por elementos ópticos giratórios, como espelhos e prismas, ou por elementos defletores como galvanômetros. Sua função é coletar os feixes gerados pelo emissor e direcioná-los para a superfície a ser levantada. Cada pulso enviado cobre uma área circular finita desta superfície, determinada pelo campo de visada instantâneo do sensor (MIKHAI *et al.*, 2001).

O **receptor eletro-óptico** registra a intensidade e um contador determina o tempo de retorno para cada eco refletido pela superfície dos objetos irradiados. Além disso, um codificador mede o ângulo de inclinação, em relação à vertical local, para cada pulso emitido. O tempo de retorno de um pulso é utilizado para calcular a distância entre o ponto irradiado e o sensor, através da equação:

$$d = c \frac{t}{2}, \quad (48)$$

na qual t é o tempo decorrido entre a emissão e a recepção de um pulso e c é a velocidade da luz.

O registro das intensidades dos pulsos de retorno permite obter uma imagem de intensidade da área recoberta. A intensidade de um pulso é a parcela da energia do pulso emitido que retorna ao sistema após interagir com os elementos constituintes da superfície levantada. Um pulso de retorno é caracterizado por uma combinação de elevações dentro do campo de visada instantâneo do sensor. Cada pulso pode ter múltiplos retornos (ecos), resultantes da reflexão parcial da cobertura vegetal ou em extremidades de outras feições elevadas como edifícios (MIKHAIL *et al.*, 2001). Atualmente, a grande maioria dos sistemas tem a capacidade de registrar múltiplos ecos, bem como a intensidade de cada pulso retornado.

O **sistema de posicionamento e orientação** é composto por dois sensores de navegação: 1) um GNSS diferencial de alta acurácia, composto por um receptor fixo à aeronave e um conjunto de estações terrestres de referência, cuja função é coletar dados para a estimação das posições espaciais da aeronave durante o levantamento; 2) um sistema de navegação (ou unidade de medição) inercial (INS/IMU) que registra as informações de orientação (ângulos de atitude ω , φ e κ) da aeronave, bem como informações de posição entre as atualizações do GNSS diferencial.

2.5.2 *Processamento dos dados de varredura a LASER*

Os sistemas de varredura a LASER coletam grandes volumes de dados que requerem várias etapas de processamento para a produção de modelos digitais de elevações. Durante o processamento, os dados registrados pelos sensores são combinados de modo a estimar coordenadas tridimensionais para os pontos de elevação definidas em algum referencial terrestre. Ao final do processamento, uma densa malha de pontos de elevação irregularmente distribuídos é obtida, uma vez que o sistema gera e emite pulsos LASER em alta frequência (WOLF e DEWITT, 2000). A distribuição dos pontos na superfície levantada depende de fatores como a altura de voo e a velocidade da aeronave, bem como do padrão de varredura adotado pelo sistema utilizado no levantamento (WEHR e LOHR, 1999).

O cálculo das coordenadas de cada ponto de elevação da malha é análogo à determinação da posição tridimensional de cada pulso retornado. Para tanto, são executados os seguintes passos:

- A **posição** do sensor no instante de emissão de cada pulso é obtida a partir dos dados registrados pelo sistema de posicionamento e orientação e dos deslocamentos entre a antena do receptor GNSS e a abertura do sistema (por onde os feixes LASER são emitidos e recebidos);
- A **direção** de cada pulso emitido é calculada a partir dos dados do INS, dos deslocamentos angulares entre o INS e a base do sensor e do ângulo de inclinação do feixe em relação à vertical local;
- A **distância** entre o sensor e o ponto irradiado é calculada a partir do tempo de retorno do pulso, obtido através da equação 48.

Todas essas informações são posteriormente combinadas, de modo a produzir as coordenadas tridimensionais de cada ponto levantado. Os deslocamentos lineares e angulares existentes entre os componentes do sistema são estimados através de um procedimento de calibração, realizado a partir de um conjunto de dados obtidos em levantamentos com o sistema de varredura a LASER em áreas de referência, como terrenos planos e áreas urbanas densas, sobrevoadas em diferentes direções (WEHR e LOHR, 1999). Além disso, de acordo com o tipo de aplicação, podem ser utilizadas operações adicionais de filtragem para remover o dossel da vegetação, além do reconhecimento e remoção de objetos altos como edifícios e árvores, a fim de se produzir um modelo digital de terreno (MIKHAIL *et al.*, 2001).

2.5.3 Complementaridade entre dados fotogramétricos e de varredura a LASER

Os dados fotogramétricos e de varredura a LASER apresentam características complementares que podem beneficiar processos como a extração de edifícios. Os dados de varredura a LASER são caracterizados pela alta qualidade altimétrica dos pontos amostrados sobre as superfícies dos telhados, o que possibilita extrair automaticamente e de forma acurada e confiável as faces planas que definem os telhados. As cumeeiras de telhado também podem ser obtidas facilmente e com elevada acurácia a partir da intersecção destas faces. Já a extração de pontos de elevação sobre os telhados a partir de pares estereoscópicos de imagens aéreas é um procedimento complexo mesmo para um operador, devido à

dificuldade para se identificar visualmente e de maneira acurada as posições de pontos homólogos em regiões homogêneas.

Por outro lado, a informação representada nos dados de varredura a LASER possui essencialmente caráter geométrico: embora todos os sistemas atualmente possibilitem a geração de uma imagem digital a partir do registro da intensidade de retorno resultante da interação dos pulsos com a superfície levantada, seu uso é limitado na extração de edifícios (DAL POZ, 2009), uma vez que sua qualidade geométrica (baixa definição dos limites entre objetos) e radiométrica (presença de ruídos) é inferior quando comparada à das imagens aéreas convencionais. Estas são caracterizadas pelo seu alto detalhamento e caráter semântico: os limites entre os edifícios e outros objetos geralmente são bem definidos, o que possibilita a extração acurada de seus contornos de telhado. A Tabela 1 resume as características complementares existentes entre estes dados para a extração de edifícios.

Tabela 1 – Complementaridade entre dados de varredura a LASER e imagens aéreas na extração de edifícios – Fonte: Dal Poz (2009).

Elemento de comparação	Varredura a LASER	Imagens aéreas
Linhas de descontinuidade	Baixa qualidade posicional	Alta qualidade posicional
Regiões homogêneas	Densa informação posicional	Pouca informação posicional
Precisão posicional	Melhor em altimetria	Melhor em planimetria
Informação semântica	Baixa	Alta

2.6 Representação de superfícies

Uma maneira comumente utilizada para representar uma superfície em meio computacional é através da geração de um modelo digital de elevações (MDE). Um MDE é uma representação matemática digital de um objeto real ou virtual e seu ambiente, definido genericamente por um conjunto de pontos com coordenadas tridimensionais denominados pontos de elevação (PAPARODITIS e POLIDORI, 2002).

MDE pode ser entendido como um conceito genérico que pode se referir tanto às elevações do terreno quanto às de objetos acima dele. Quando um MDE contém informações de elevações de pontos sobre a superfície do terreno e de objetos como edifícios e árvores, é denominado MDS – modelo digital de superfície (PAPARODITIS e POLIDORI, 2002). A Figura 9 ilustra esquematicamente o conceito de MDS.

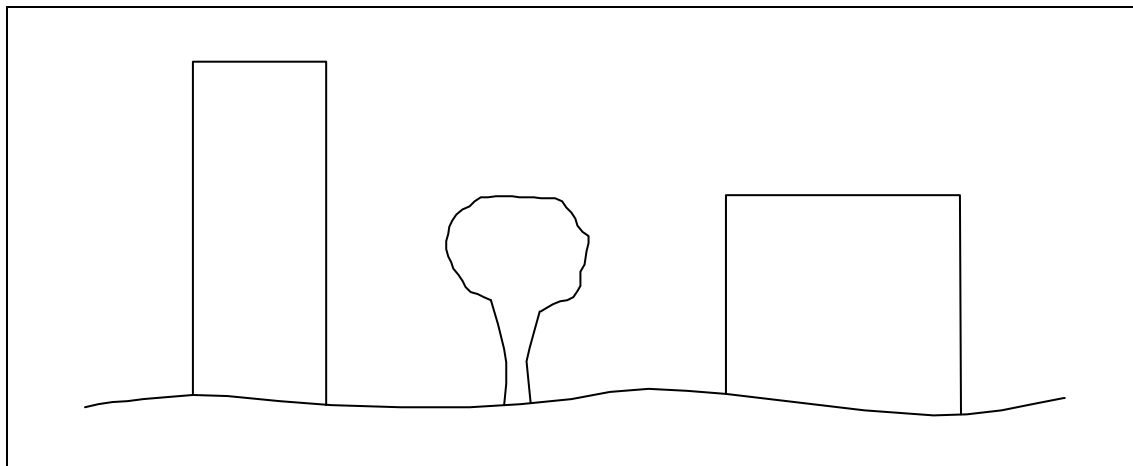


Figura 9 – Representação esquemática de um modelo digital de superfície.

Quando a informação se restringe a pontos de elevação descrevendo a superfície topográfica (terreno e corpos d'água) o MDE é denominado MDT – modelo digital de terreno (PAPARODITIS e POLIDORI, 2002). A Figura 10 ilustra esquematicamente o conceito de MDT.

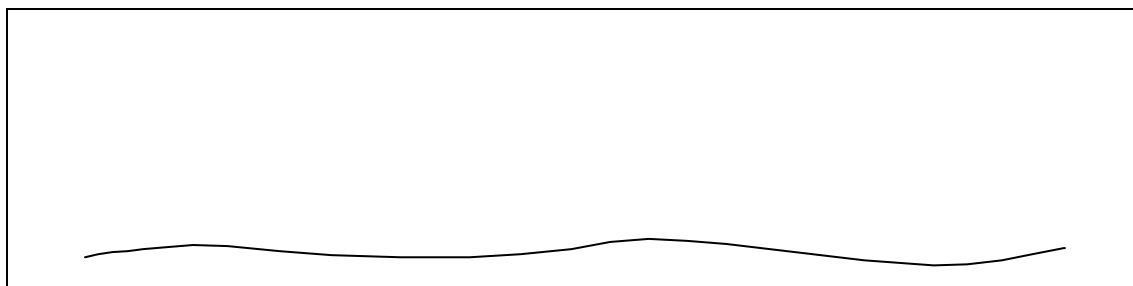


Figura 10 – Representação esquemática de um modelo digital de terreno.

Existem duas formas principais de organização dos pontos de elevação na estrutura de dados que representa um MDE: na primeira os pontos de elevação estão dispostos na forma de uma grade regular, formando uma estrutura de dados semelhante à de uma imagem digital; na segunda os pontos do modelo estão distribuídos de maneira irregular, o que permite sua organização na forma de uma estrutura de dados composta por uma rede irregular de triângulos (TIN – *Triangular Irregular Network*).

Um MDE, tanto em formato de grade regular quanto TIN, permite a inclusão de feições lineares denominadas linhas de quebra, que são utilizadas para representar discontinuidades na declividade da superfície representada (MIKHAIL *et al.*, 2001). As linhas de quebra possuem inclinação constante e representam discontinuidades como linhas de drenagem (fundos de vale e fluxos de água tais como riachos e córregos), muros de contenção, paredes de edifícios, penhascos, entre outras. O uso de linhas de quebra permite

gerar uma modelagem mais fiel e representativa das características da superfície (WOLF e DEWITT, 2000).

2.6.1 Grades regulares

A estrutura de grade regular de um MDE é composta por um conjunto de pontos espaçados uniformemente nas direções X e Y , cujos valores de elevações Z são armazenados digitalmente na forma de um vetor sequencial de números (WOLF e DEWITT, 2000). Em uma grade regular, as posições horizontais são definidas com base em um sistema de coordenadas que pode ser tanto cartesiano (p.ex. UTM - *Universal Transversa de Mercator*) quanto geodésico (MIKHAIL *et al.*, 2001). A Figura 11 mostra um exemplo da estrutura de grade regular que inclui também uma linha de quebra representada por uma linha poligonal tracejada.

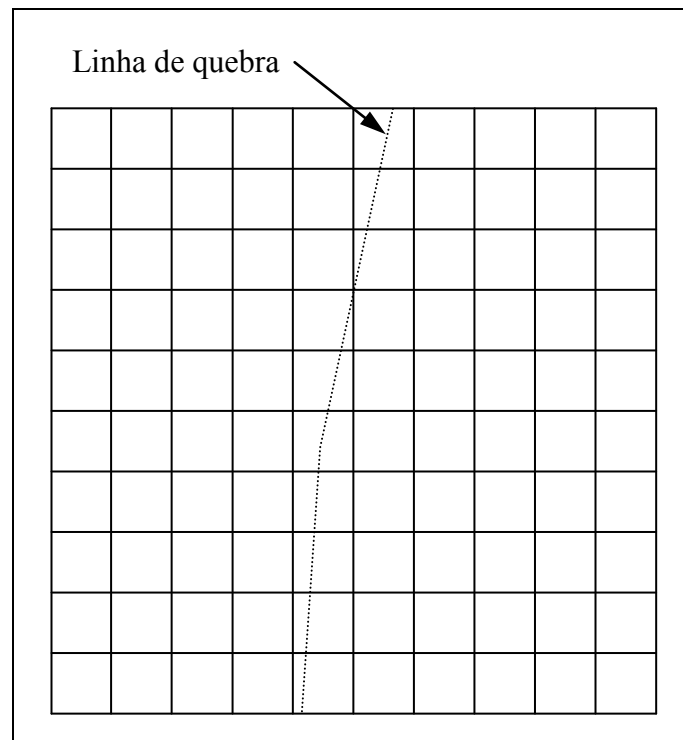


Figura 11 – Estrutura de grade regular representativa de um MDE.

A estrutura de grade regular permite o uso de algoritmos simples para o processamento da malha de pontos. Estes algoritmos são basicamente derivados daqueles para processamento de imagens digitais e permitem a realização de tarefas como:

- Geração de mapas de contornos através de métodos de interpolação;
- Cálculo de volumes de cortes e aterros para obras de engenharia civil;

- Geração de mapas de declividade;
- Geração de imagem ortorretificadas;
- Visualização de cenas tridimensionais.

Uma desvantagem desta estrutura é que em superfícies planas ou com poucas variações de relevo, a representação de um MDE através de uma grade regular pode ser ou se tornar redundante e computacionalmente onerosa, principalmente se um grande número de pontos de elevação for utilizado. Isto pode acarretar em desperdício de memória de armazenamento e de tempo computacional para o processamento dos dados.

2.6.2 Rede irregular de triângulos – TIN

A representação de um MDE através de uma rede irregular de triângulos é particularmente adequada quando a fonte de dados utilizada para produzir o modelo gera uma malha irregular de pontos de elevação, como é o caso dos sistemas aerotransportados de varredura a LASER, apresentados na Seção 2.5.

A estrutura de dados para armazenamento e representação de um TIN é mais complexa quando comparada à de uma grade regular e requer o armazenamento das coordenadas (X, Y, Z) de todos os pontos da malha irregular. Também é necessário armazenar nessa estrutura a representação das faces resultantes da organização desses pontos (vértices), além das relações topológicas existentes entre vértices, faces e arestas que descrevem a triangulação. Conseqüentemente, a geração e extração de informações a partir de modelos em formato TIN requer o uso de algoritmos mais complexos e sofisticados quando comparados àqueles utilizados na geração e manipulação de grades regulares.

Em uma estrutura TIN, os pontos da malha irregular são conectados de modo a formar triângulos com alguma propriedade bem definida. Estes triângulos possuem faces planas inclinadas no espaço tridimensional, sendo que cada aresta (lado formado pela conexão de dois vértices) possui uma inclinação uniforme. O sistema de triângulos formado é topologicamente organizado de modo a produzir a estrutura de representação TIN (WOLF e DEWITT, 2000). Um exemplo ilustrativo é dado pela Figura 12.

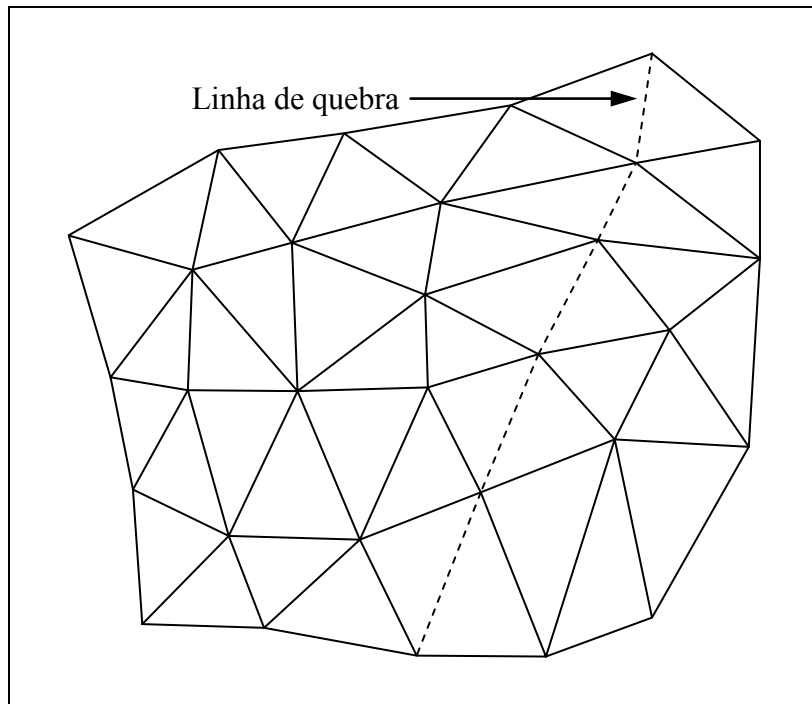


Figura 12 – Estrutura de representação TIN de um MDE.

Para a geração de um MDE na forma de uma estrutura TIN, o algoritmo mais comumente utilizado é a *Triangulação de Delaunay*, que produz um conjunto de triângulos topologicamente organizados que atendem à seguinte propriedade: a circunferência circunscrita a um triângulo não contém em seu interior vértices de outros triângulos além daqueles compartilhados por seus triângulos vizinhos. Além disso, os dados são organizados na estrutura de modo que os triângulos formados sejam, sempre que possível, aproximadamente equiláteros. A Figura 13 ilustra esta propriedade.

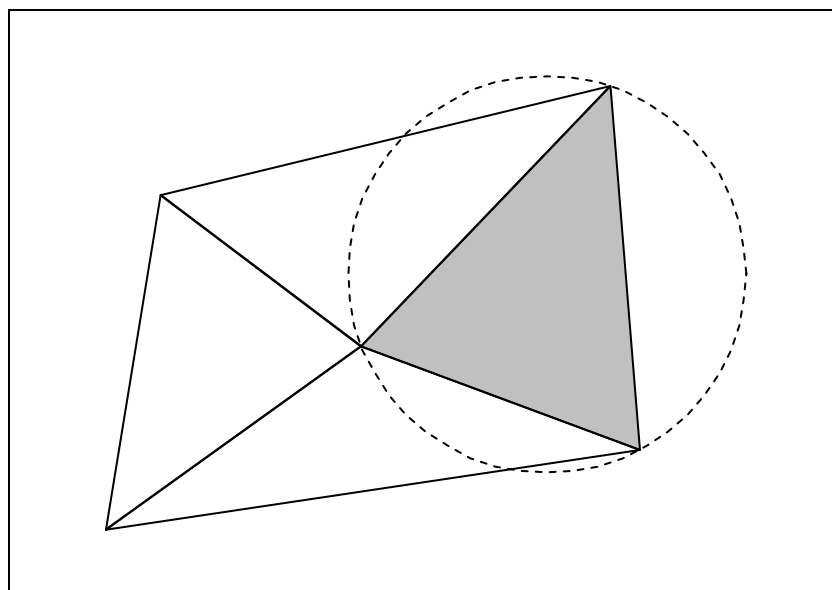


Figura 13 – Propriedade da *Triangulação de Delaunay*.

Conforme foi mencionado anteriormente, modelos representados na forma de estruturas TIN também permitem a inclusão de linhas de quebra. No caso de um TIN, uma linha de quebra é formada por uma sequência de segmentos retos, sendo cada um deles correspondente à aresta compartilhada por dois triângulos adjacentes. A estrutura TIN ilustrada pela Figura 12 inclui uma linha de quebra representada como uma linha poligonal tracejada.

2.6.3 Interpolação de elevações

Em diversas aplicações é desejável a obtenção de valores de elevação para pontos que não pertençam efetivamente à estrutura de um MDE. Por exemplo, pode-se desejar obter uma grade regular a partir de uma estrutura TIN. De fato, alguns algoritmos para extrair informações a partir de um MDE requerem o uso de uma grade regular e, por conseguinte, um modelo com estrutura TIN deve ser previamente reamostrado para uma estrutura de grade regular. Em qualquer caso, tais tarefas podem ser convenientemente realizadas através do uso de métodos de interpolação tais como o *vizinho mais próximo*, *inverso do quadrado da distância*, *interpolação bilinear*, *ajuste polinomial de superfícies* e *krigagem*.

No caso do adensamento (reamostragem) de uma grade regular existente, é necessário encontrar os quatro pontos vizinhos do ponto cujo valor de elevação será calculado. Em uma estrutura de grade regular, a determinação de tais pontos é feita diretamente através de operações aritméticas simples, o que facilita a obtenção dos valores de elevação através dos métodos de interpolação mencionados.

A geração de uma grade regular a partir de uma estrutura TIN é um procedimento mais complexo e envolve a determinação do triângulo que contém cada ponto da grade a ser produzida. Tal procedimento implica na utilização de algoritmos de busca sofisticados que aumentam o custo computacional em comparação ao adensamento de uma grade regular. Após a determinação do triângulo que contém um dado ponto da grade, seu valor de elevação é interpolado a partir dos valores de elevação dos vértices do referido triângulo.

A Figura 14 ilustra uma célula genérica definida por quatro pontos pertencentes a uma estrutura de grade regular. Esta célula é delimitada pelos pontos de elevação com coordenadas (X_i, Y_i, Z_1) , (X_{i+1}, Y_i, Z_2) , (X_i, Y_{i-1}, Z_3) e (X_{i+1}, Y_{i-1}, Z_4) . Também

são representadas as distâncias horizontais d_1 , d_2 , d_3 e d_4 de cada ponto da célula a um ponto P de coordenadas (X, Y) cujo valor de elevação Z deve ser interpolado.

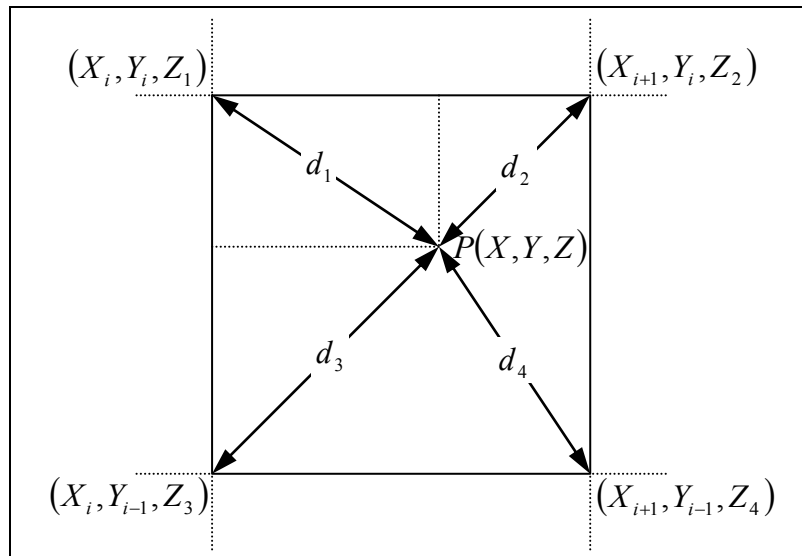


Figura 14 – Interpolação de valores de elevação a partir de pontos pertencentes a uma estrutura de grade regular.

A Figura 15 ilustra um triângulo pertencente a uma estrutura TIN, definido pelos vértices $V_1(X_1, Y_1, Z_1)$, $V_2(X_2, Y_2, Z_2)$ e $V_3(X_3, Y_3, Z_3)$, bem como o ponto P de coordenadas (X, Y, Z) pertencente a uma grade regular, cujo valor de elevação Z deve ser interpolado. Também são representadas as distâncias horizontais d_1 , d_2 e d_3 do ponto da grade a cada um dos vértices do triângulo.

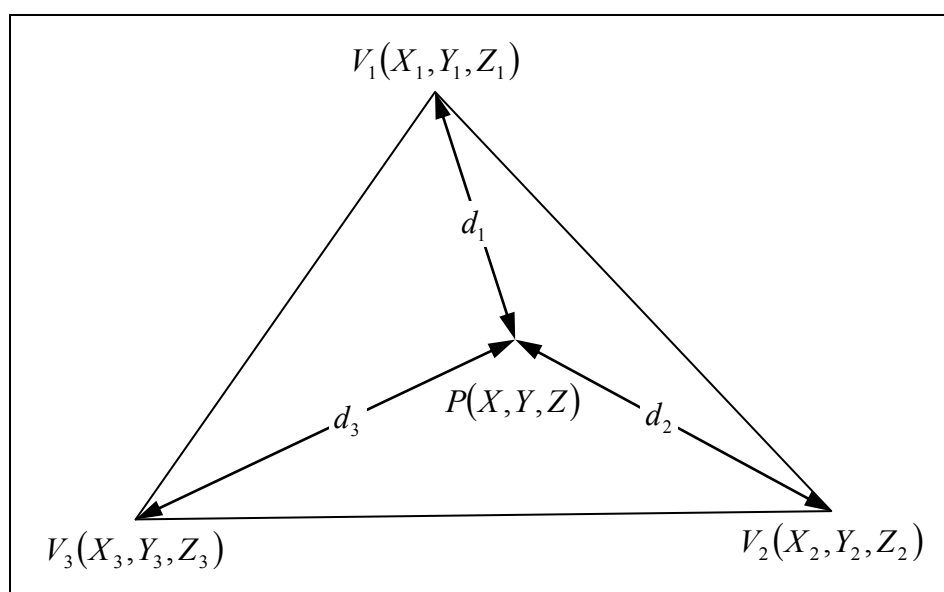


Figura 15 – Interpolação de valor de elevação para um ponto de uma grade regular a partir dos vértices de um triângulo pertencente a uma estrutura TIN.

No método de interpolação pelo *vizinho mais próximo*, o valor de elevação Z do ponto P é tomado do ponto de elevação mais próximo a ele, ou seja, daquele situado à menor distância de P .

No método de interpolação pelo *inverso do quadrado da distância*, o valor de elevação Z para o ponto P é obtido a partir de uma média ponderada dos valores de elevação dos pontos próximos a ele. Para o caso ilustrado pela Figura 14, o valor de Z é obtido através da equação:

$$Z = \frac{\frac{1}{d_1^2} Z_1 + \frac{1}{d_2^2} Z_2 + \frac{1}{d_3^2} Z_3 + \frac{1}{d_4^2} Z_4}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} + \frac{1}{d_4^2}} = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i^2} Z_i}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i^2}}. \quad (49)$$

Quando o valor de elevação para o ponto P é obtido a partir dos vértices de um triângulo pertencente a uma estrutura TIN (Figura 15), utiliza-se a equação:

$$Z = \frac{\frac{1}{d_1^2} Z_1 + \frac{1}{d_2^2} Z_2 + \frac{1}{d_3^2} Z_3}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{d_i^2} Z_i}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{d_i^2}}. \quad (50)$$

A análise das equações 49 e 50 indica que os pesos são proporcionais ao inverso do quadrado das distâncias horizontais do ponto P aos pontos de elevação utilizados na interpolação e, portanto, pontos de elevação mais próximos a P contribuem mais fortemente na definição do valor de elevação Z .

Alternativamente, para o caso ilustrado pela Figura 14, pode ser utilizado o método de *interpolação bilinear* para determinar o valor de elevação para o ponto P . Neste método, geralmente são realizadas duas interpolações lineares ao longo da direção X e uma na direção Y (daí seu nome). Para o caso em questão, o valor de elevação Z é dado por:

$$Z = \frac{1}{(Y_{i-1} - Y_i)(X_{i+1} - X_i)} \left\{ (Y - Y_i)[MZ_4 - NZ_3] - (Y - Y_{i-1})[MZ_2 - NZ_1] \right\}, \quad (51)$$

com $M = X - X_i$ e $N = X - X_{i+1}$.

O método de *ajuste polinomial de superfícies* emprega o critério dos mínimos quadrados para ajustar a superfície polinomial $Z = F(X, Y)$ aos pontos de elevação que definem uma célula de uma grade regular como aquela ilustrada pela Figura 14. Para o

caso de um triângulo pertencente a uma estrutura TIN (Figura 15), é determinada a equação do plano $Z = F(X, Y)$ passante pelos vértices do triângulo que contém o ponto P . Após a estimação dos coeficientes da superfície polinomial ou da equação do plano, o valor de elevação Z é calculado em função das coordenadas (X, Y) do ponto P .

Por último, a *krigagem* é um método de interpolação estatístico que leva em conta a correlação espacial entre os pontos de elevação originais e depende da definição prévia de um variograma, que quantifica a influência que esses pontos terão sobre os novos pontos da grade regular a serem interpolados (WOLF e DEWITT, 2000).

2.6.4 Coleta de dados para a produção de MDE

Os dados básicos utilizados na produção de um MDE são derivados da amostragem de pontos de elevação a partir de fontes de dados como:

- Digitalização de curvas de nível;
- Captura através de métodos fotogramétricos;
- Levantamentos em campo;
- Obtenção direta através de sensores ativos.

Para gerar um MDE através da digitalização de curvas de nível, estas são obtidas a partir de mapas analógicos utilizando-se métodos de digitalização manual, semiautomática ou automática. As curvas de nível obtidas, descritas por conjuntos de pontos, são posteriormente editadas, registradas e rotuladas com valores de elevação. A partir dos pontos que descrevem cada uma das curvas de nível digitalizadas, é obtida uma malha regular de pontos, através da aplicação de métodos de interpolação, que é utilizada posteriormente na geração do MDE desejado. Um modelo obtido a partir da digitalização de curvas de nível se constitui geralmente em um MDT, uma vez que estas são representadas em um mapa analógico por linhas descritas por pontos de mesma elevação sobre a superfície do terreno.

A captura de dados através de métodos fotogramétricos é uma das principais fontes de dados para a produção de MDE e é geralmente utilizada quando são exigidos altos níveis de acurácia para os modelos a serem gerados. Neste caso, a extração de pontos de elevação pode ser realizada tanto de modo manual quanto automático, a partir de pares estereoscópicos de imagens aéreas e/ou orbitais.

No método manual, o operador observa e registra um conjunto de pontos de elevação seguindo um padrão pré-estabelecido, a partir dos pares estereoscópicos das imagens que compõem a área de interesse. Alternativamente, o operador pode extrair, a partir dos pares estereoscópicos, as curvas de nível que são posteriormente utilizadas para gerar o MDE desejado. Embora seja uma alternativa, atualmente o procedimento inverso é o mais comum, ou seja, a geração das curvas de nível a partir de um MDE. A principal vantagem do modo de aquisição manual é a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos, embora seja lento e dispendioso em grandes áreas.

A extração automática de pontos de elevação através de métodos fotogramétricos é baseada em procedimentos de correspondência automática de imagens. Estes são geralmente implementados em um sistema fotogramétrico digital, que se encarrega de extrair automaticamente uma densa malha de pontos de elevação a partir de pares estereoscópicos de imagens da área de interesse e, a partir desta malha, produzir o MDE desejado. Esses sistemas geralmente possuem um conjunto de ferramentas que permitem editar o modelo gerado possibilitando, por exemplo, a inclusão e exclusão de pontos de elevação e/ou linhas de quebra.

O modo de produção automático é rápido e relativamente econômico em termos computacionais, entretanto, não produz resultados confiáveis em áreas complexas onde geralmente os procedimentos de correspondência automática de imagens costumam falhar, como é o caso de cenas urbanas densas, florestas e superfícies homogêneas de corpos d'água, faixas de areia e locais cobertos por gelo ou neve. Consequentemente, o MDE produzido requer um procedimento posterior de edição manual para corrigir os problemas decorrentes do processo de extração automática. Vale ressaltar que em áreas homogêneas os sistemas de varredura a LASER se tornam vantajosos em relação à Fotogrametria convencional, uma vez que a geração dos dados necessários à produção de modelos digitais de elevações independe do estabelecimento de correspondência entre pontos homólogos.

A aquisição de pontos de elevação por meio de métodos de levantamento em campo se consistiu em uma das fontes mais acuradas de dados para a produção de um MDE. Entretanto, é viável apenas para projetos específicos abrangendo pequenas áreas, pois requer muito tempo de permanência em campo para a execução dos trabalhos necessários ao levantamento e para a etapa posterior de processamento dos dados e geração do modelo.

Por fim, uma das formas mais utilizadas atualmente para a produção de MDE é a coleta de pontos de elevação através de modernos sensores como os sistemas

aerotransportados de varredura a LASER (apresentados na Seção 2.5) e radares altimétricos aerotransportados ou orbitais.

2.7 *Análise de componentes conexos*

A análise de componentes conexos (também denominada rotulação de componentes conexos) é de extrema importância na análise automática de imagens. No domínio de uma imagem, um componente conexo de um subconjunto S de pixels da imagem é definido pelos pixels em S que estão conectados a um dado pixel p de S (GONZALES e WOODS, 2000). A Figura 16 ilustra a representação de um componente conexo (definido pelos pixels conectados a p) em um subconjunto S de pixels de uma imagem.

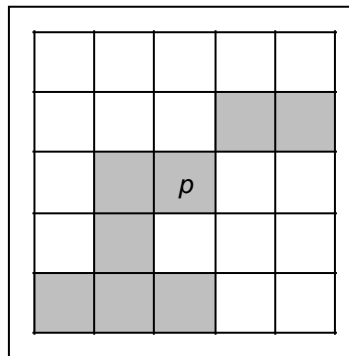


Figura 16 – Ilustração do conceito de componentes conexos de uma imagem.

Como pode ser observado, para a rotulação de componentes conexos em uma imagem, é necessário verificar se conjuntos de pixels se conectam entre si, o que implica em estabelecer critérios de adjacência e similaridade entre eles. O conceito de componentes conexos pode ser facilmente estendido também para redes irregulares de triângulos que representam um MDE. Para tanto, é necessário o estabelecimento de relações de conectividade entre as faces que definem essa estrutura.

Uma das possíveis relações que pode ser empregada baseia-se nos seguintes critérios: 1) duas faces f_1 e f_2 de uma estrutura TIN são conectadas se elas são adjacentes, ou seja, se f_1 e f_2 forem vizinhas (compartilharem uma aresta) e; 2) se uma ou mais propriedades de f_1 e f_2 satisfizerem a critérios de similaridade pré-estabelecidos. A Figura 17 ilustra a extensão do conceito de componentes conexos a uma estrutura de rede irregular de triângulos.

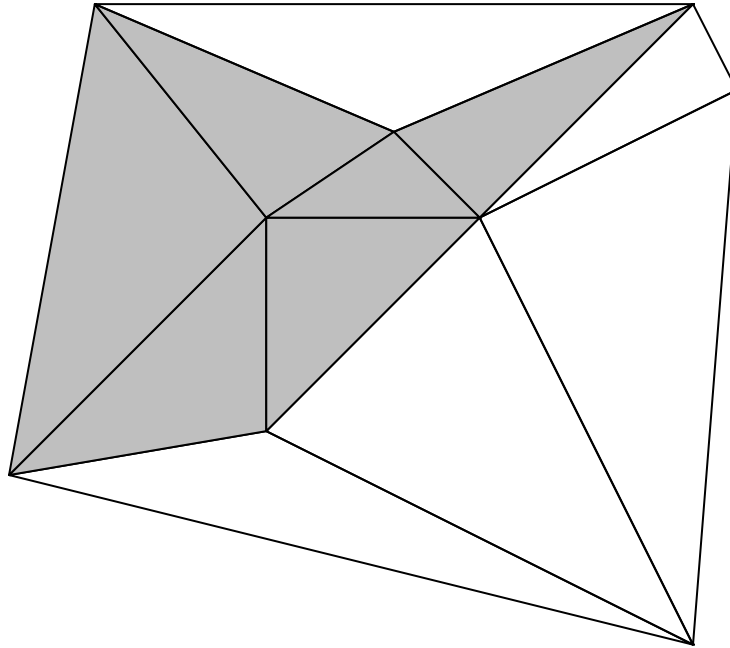


Figura 17 – Ilustração do conceito de componentes conexos em uma estrutura de rede irregular de triângulos.

Para a definição dos componentes conexos de uma triangulação, é necessário percorrer as faces que definem esta estrutura em busca de agrupamentos de faces que satisfaçam aos critérios de similaridade estabelecidos no início da análise. Ao término do processo, cada um destes agrupamentos será definido por um valor (rótulo) que identifica cada componente conexo e uma lista de identificadores das faces que definem cada agrupamento.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Este capítulo descreve o método para a extração de contornos de telhado de edifícios proposto neste trabalho. Inicialmente é apresentada a formulação de um modelo matemático para representar essas feições no espaço-imagem, a partir do qual é derivado um modelo matemático para a extração dos contornos de telhado em um referencial do espaço-objeto. Também é apresentada a estratégia de solução deste modelo através do algoritmo de programação dinâmica. O método proposto pode ser visualizado através do fluxograma apresentado na Figura 18.

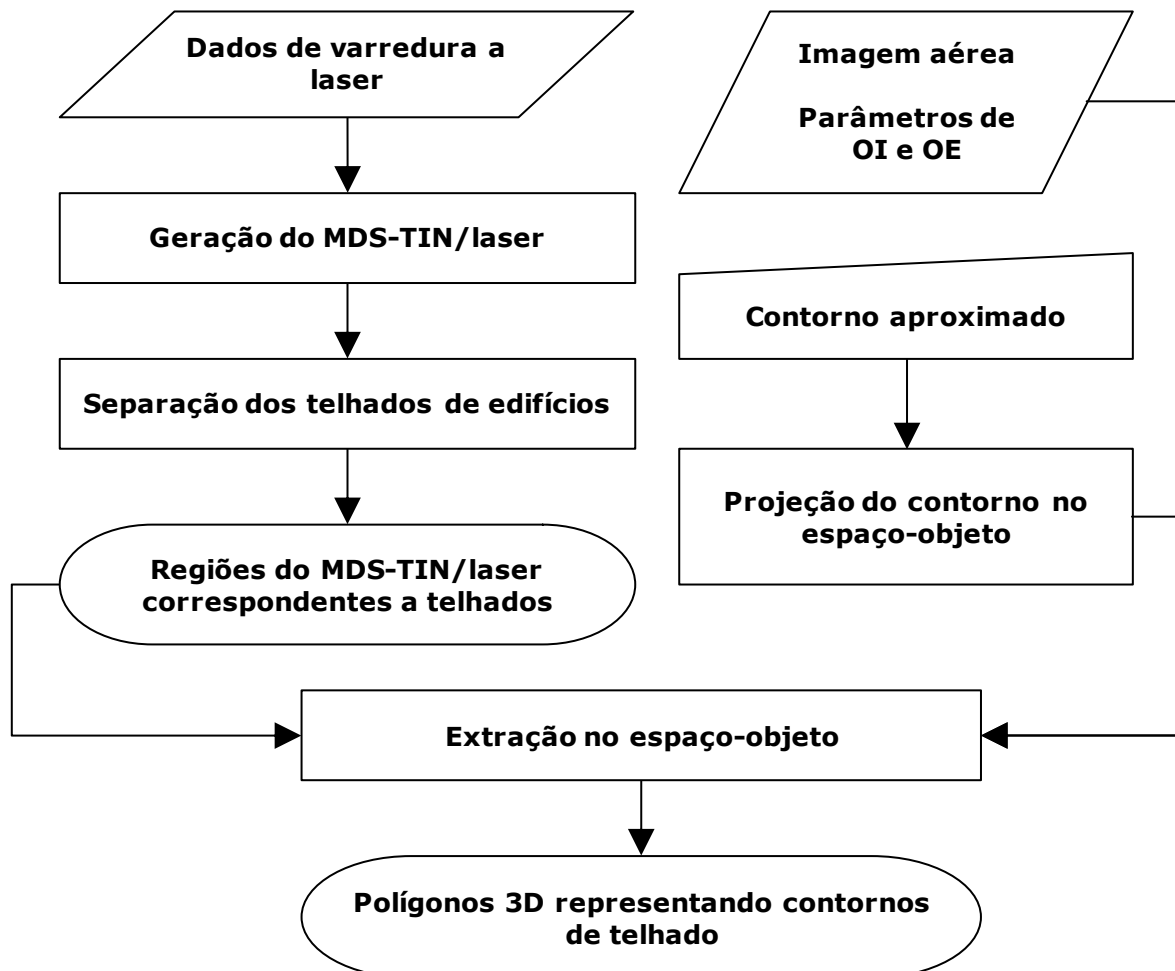


Figura 18 – Fluxograma do método de extração de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto.

Os dados de entrada para o método são uma imagem aérea digital de alta resolução e uma malha irregular de pontos tridimensionais derivados de dados de varredura a

LASER aerotransportado, além dos parâmetros de orientação interior (OI) e orientação exterior (OE) associados à imagem aérea de entrada. A inicialização do processo é realizada pelo operador, que identifica um edifício e mede um contorno aproximado de seu telhado a partir da imagem aérea que, em seguida, é transformado para o referencial do espaço-objeto com base nos parâmetros de OI e OE dessa imagem e no TIN, gerado a partir da malha irregular de pontos derivados dos dados de varredura a LASER através da técnica de triangulação de *Delaunay*. Na etapa de inicialização o operador decide também se deseja aplicar uma filtragem passa-baixas para atenuação de eventuais ruídos presentes na imagem aérea de entrada, com o objetivo de minimizar o efeito negativo destes elementos sobre os resultados produzidos pelo método.

Após a inicialização do método é executado o algoritmo de extração no espaço-objeto, baseado na otimização do modelo matemático representativo dos contornos de telhado através do algoritmo de PD. O resultado do processo de extração são polígonos tridimensionais representando os contornos de telhado dos edifícios no referencial do espaço-objeto. Os modelos matemáticos envolvidos e a estratégia de solução através do algoritmo de PD são apresentados na sequência.

3.2 *Modelo matemático de edifícios no espaço-imagem*

De acordo com Rütter *et al.* (2002), um modelo matemático genérico para extrair feições a partir de uma imagem pode ser formulado com base em propriedades bem definidas dessas feições na imagem. Por sua vez, tais propriedades podem ser formuladas em termos de funções de energia externa de uma curva *snakes*, conforme visto no Capítulo 2.

Para o caso específico de edifícios presentes em imagem aéreas, uma dessas propriedades relevantes refere-se ao fato de suas bordas geralmente se apresentarem de forma contínua e limitarem regiões bem contrastadas nesse tipo de imagem. Essa informação sugere que a soma dos quadrados dos gradientes em pontos de borda multiplicada por uma constante negativa tende a um valor mínimo. Esta propriedade pode ser matematicamente expressa por:

$$\bar{E}_{borda}(v) = -\sum_{i=1}^e \gamma_i |\nabla G(v_i)|^2, \quad (52)$$

na qual e é o número total de pontos de borda, γ_i é uma constante positiva e $|\nabla G(v_i)|$ é a magnitude do gradiente no ponto de borda v_i .

Outra propriedade relevante refere-se ao fato de que edifícios, na maioria dos casos, são representados por estruturas retilíneas em imagem aéreas, definidas por segmentos de borda consecutivos formando ângulos retos em suas quinas ou cantos. Sendo assim, um termo de energia externa adicional pode ser definido através da equação:

$$\bar{E}_{quina}(v) = -\sum_{i=1}^c \eta_i \left[(1 - \cos(\delta_i)) \cdot CS(v_i) \right]^2, \quad (53)$$

onde c é o número total de quinas, η_i é uma constante positiva, $CS(v_i)$ é a resposta de um operador de detecção de quinas e δ_i é o ângulo de deflexão no vértice de quina v_i . O termo $(1 - \cos(\delta_i))$ é uma função de ponderação que favorece quinas em ângulos retos, conforme ilustra a Figura 19.

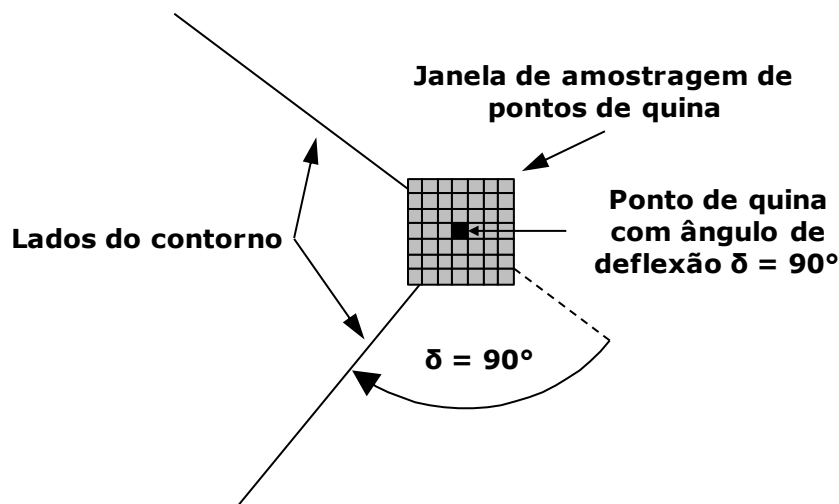


Figura 19 – Esquema ilustrativo do conceito de energia de quinas.

O modelo matemático de contornos de telhado de edifícios baseado em *snakes* pode então ser finalmente expresso ao se incorporar as funções de energia externa dadas nas equações 52 e 53 na função de energia de uma curva *snakes* (equação 26), resultando em:

$$\bar{E}_2(v) = \sum_{i=1}^n \left[\alpha_i |v_{i+1} - v_i|^2 + \beta_i |v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1}|^2 - \gamma_i |\nabla G(v_i)|^2 - \eta_i \left[(1 - \cos(\delta_i)) CS(v_i) \right]^2 \right]. \quad (54)$$

Os valores dos pesos β_i , γ_i e η_i dependem do tipo de descontinuidade existente no vértice v_i : borda degrau ou quina. Todos os pesos são positivos, mas em se

tratando de uma quina, deve ocorrer em v_i uma mudança abrupta na direção da curva (polígono que representa o contorno de telhado de um edifício). Isto implica na necessidade de se anular β_i para possibilitar a ocorrência de uma descontinuidade de segunda ordem no vértice v_i . Além disso, o termo de energia de borda (equação 52) passa a não ter poder de discriminação da descontinuidade em v_i , implicando na necessidade de se ter $\gamma_i = 0$. Ao contrário, quando em v_i estiver presente uma descontinuidade do tipo borda degrau, o termo de energia de quina (equação 53) não terá poder discriminatório. Nesse caso, deve-se anular o peso η_i .

A solução para a função-objetivo resultante pode ser obtida ao se encontrar um valor mínimo global de energia para a equação 54, que corresponde a um conjunto $v = \{v_1, \dots, v_n\}$ de vértices (pontos de borda e quina pertencentes a um espaço amostral convenientemente definido) que representam o contorno de telhado de um edifício. É importante ressaltar que o valor mínimo de energia obtido pelo algoritmo de PD para um dado problema de otimização depende da amostragem do espaço de busca: no caso do problema de otimização representado pela equação 54, o valor mínimo depende do número de vértices v_i e da quantidade de amostras geradas no espaço de busca para cada um destes, variando para diferentes combinações adotadas.

A equação 54 apresenta uma estrutura em que apenas os vértices $v_{i-1}(C_{i-1}, L_{i-1})$, $v_i(C_i, L_i)$, $v_{i+1}(C_{i+1}, L_{i+1})$ do polígono que representa o contorno de telhado de um edifício estão simultaneamente inter-relacionados. Dessa forma, pode-se reescrever essa equação (como uma somatória de funções E_i de energia) na forma:

$$\bar{E}_2(v) = \sum_{i=1}^n \bar{E}_i(v_{i-1}(C_{i-1}, L_{i-1}), v_i(C_i, L_i), v_{i+1}(C_{i+1}, L_{i+1})). \quad (55)$$

3.3 Modelo matemático de edifícios no espaço-objeto

Conforme foi mostrado anteriormente, o modelo matemático representando o contorno de telhado de um edifício no espaço-imagem tem como incógnitas as coordenadas (C, L) dos vértices do polígono correspondente a esse contorno. A equação 55 pode ser modificada, de modo a expressar os contornos de telhado de edifícios em função de

coordenadas em um referencial do espaço-objeto. A equação resultante corresponde à função-objetivo a ser solucionada pelo algoritmo de PD.

O pré-requisito básico para modificar o modelo descrito na Seção 3.2 é adotar um referencial do espaço-objeto para definir as coordenadas tridimensionais dos vértices dos polígonos representando os contornos de telhado de edifícios. Para tanto, é selecionado o sistema de coordenadas híbrido (E, N, H) (coordenadas no sistema de projeção UTM com altitude ortométrica). Embora este sistema de referência não seja cartesiano, a relação matemática entre um ponto $V(E, N, H)$ no espaço-objeto e o correspondente ponto $v(C, L)$ no espaço-imagem é bem conhecida. De forma a estabelecer rigorosamente esta relação, é necessário o conhecimento prévio dos parâmetros de orientação interior e exterior da imagem aérea, do referencial geodésico adotado e da projeção UTM (GALLIS, 2006).

Para imagens aéreas tomadas com câmaras fotogramétricas convencionais, a relação matemática entre um ponto no espaço-imagem $v_i(C_i, L_i)$ e o ponto correspondente no espaço-objeto $V_i(E_i, N_i, H_i)$ pode ser estabelecida por meio de uma função de parâmetros conhecidos, tais como:

- λ_{MC} : longitude do meridiano central do fuso UTM correspondente à área de coleta das imagens aéreas e dos dados de varredura a LASER;
- (a_e, f_e) : semieixo maior e achatamento do elipsoide geodésico de referência;
- \bar{N} : ondulação geoidal no ponto V_i ;
- (ϕ_0, λ_0, h_0) : coordenadas geodésicas do ponto origem do referencial cartesiano local;
- $(\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0)$: parâmetros de orientação exterior da imagem aérea (em relação ao referencial cartesiano local);
- f : distância focal calibrada da câmara;
- $\bar{T} = (a, b, c, d, \Delta C, \Delta L)$: parâmetros da transformação afim que relaciona o referencial digital e o referencial fiducial da imagem aérea (para o caso

de imagens tomadas com câmaras aéreas analógicas convencionais e posteriormente digitalizadas); ou

- $\bar{T} = (S_x, S_y, \Delta C, \Delta L)$: parâmetros da transformação isogonal que relaciona o referencial digital e o referencial intermediário da imagem aérea (para o caso de imagens tomadas diretamente através do uso de câmaras digitais);
- (x_0, y_0) : coordenadas (calibradas) do ponto principal no referencial fiducial da imagem aérea;
- (k_1, k_2, k_3) : parâmetros de distorção radial das lentes da câmara;
- (P_1, P_2) : parâmetros de distorção descentrada das lentes da câmara;
- ε_{45} : coeficiente de refração para uma atmosfera padrão, dependente da altitude ortométrica de voo e da altitude ortométrica do ponto V_i .

A relação matemática resultante da transformação de um ponto $V_i(E_i, N_i, H_i)$ para um ponto $v_i(C_i, L_i)$ envolve transformações de coordenadas entre referenciais do espaço-objeto, transformações projetivas através de equações de colinearidade, transformações entre referenciais do espaço-imagem e adição de efeitos sistemáticos às coordenadas dos pontos transformados. Maiores detalhes a respeito destas transformações podem ser encontrados na literatura específica de Fotogrametria (ANDRADE, 1998; WOLF e DEWITT, 2000; MIKHAIL *et al.*, 2001; KRAUS, 2001), Geodesia (TORGE, 2001; MONICO, 2008) e Cartografia (RICHARDUS e ADLER, 1972; BLACHUT *et al.*, 1979; YANG *et al.*, 2001). Assumindo que as coordenadas de pontos no espaço-imagem (C_i, L_i) possam ser colocadas em função de coordenadas de pontos no espaço-objeto (E_i, N_i, H_i) , tem-se (GALLIS, 2006):

$$\begin{aligned} C_i &= f_1(\bar{P}, (E_i, N_i, H_i)) \\ L_i &= f_2(\bar{P}, (E_i, N_i, H_i)) \end{aligned} \quad (56)$$

onde $\vec{P} = (\lambda_{MC}, a_e, f_e, \bar{N}, \phi_0, \lambda_0, h_0, \kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0, f, \bar{T}, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, \varepsilon_{45})$ e

$(E_i, N_i, H_i) = V_i$. Uma vez que \vec{P} é conhecido, um ponto no espaço-imagem pode ser

expresso somente em função de V_i , como segue:

$$v_i(C_i, L_i) = v_i(f_1(V_i), f_2(V_i)) = v_i(f_1(E_i, N_i, H_i), f_2(E_i, N_i, H_i)). \quad (57)$$

Substituindo a equação 57 na equação 55, obtém-se a função-objetivo:

$$\begin{aligned} \bar{E}_2(v) &= \sum_{i=1}^n \bar{E}_i(v_{i-1}(C_{i-1}, L_{i-1}), v_i(C_i, L_i), v_{i+1}(C_{i+1}, L_{i+1})) \\ &= \sum_{i=1}^n \bar{E}_i \left[\begin{array}{c} v_{i-1}(f_1(E_{i-1}, N_{i-1}, H_{i-1}), f_2(E_{i-1}, N_{i-1}, H_{i-1})), \\ v_i(f_1(E_i, N_i, H_i), f_2(E_i, N_i, H_i)), \\ v_{i+1}(f_1(E_{i+1}, N_{i+1}, H_{i+1}), f_2(E_{i+1}, N_{i+1}, H_{i+1})) \end{array} \right], \end{aligned} \quad (58)$$

que é uma função de energia *snakes* em um referencial do espaço-objeto e expressa em termos de coordenadas (E, N, H) .

Pode-se notar que a equação 58 depende das coordenadas de três pontos sucessivos do polígono representando o contorno de telhado de um edifício no espaço-objeto. Assim, essa equação pode ser reescrita na forma simplificada:

$$\bar{E}_2(V) = \sum_{i=1}^n \bar{E}_i(V_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, H_{i-1}), V_i(E_i, N_i, H_i), V_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, H_{i+1})). \quad (59)$$

A função de energia dada na equação 59 é ambígua, uma vez que o mesmo valor de energia pode ser obtido para infinitos polígonos no espaço-objeto. Esta é uma consequência direta das transformações dadas pela equação 56, já que infinitos pontos no espaço-objeto (ao longo dos feixes perspectivos) podem mapear um mesmo ponto no espaço-imagem. Consequentemente, a função de energia *snakes* expressa pela equação 59 não pode ser utilizada diretamente para a extração dos edifícios no espaço-objeto sem a imposição de restrições a fim de remover sua ambiguidade. A restrição para a remoção da ambiguidade pode ser imposta através de uma função $H_i = \bar{F}(E_i, N_i)$, possibilitando reescrever a equação 59 na forma:

$$\bar{E}_2(V) = \sum_{i=1}^n \bar{E}_i(\bar{V}_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}), \bar{V}_i(E_i, N_i), \bar{V}_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1})), \quad (60)$$

onde $\bar{V}_i(E_i, N_i) = V_i(E_i, N_i, \bar{F}(E_i, N_i))$.

Para o caso em questão, a função $H_i = \bar{F}(E_i, N_i)$ é dada pela equação do plano correspondente à face do TIN que contém V_i . A extração simultânea de contornos de telhado no espaço-imagem e no espaço-objeto corresponde a obter valores ótimos de energia para a equação 60, o que pode ser eficientemente conseguido através da otimização dessa função-objetivo pelo algoritmo de PD.

A equação 60 possui apenas seis variáveis simultaneamente inter-relacionadas, implicando numa complexidade computacional similar quando comparada à função-objetivo expressa em coordenadas no referencial do espaço-imagem (equação 55).

O uso de informações provenientes do TIN permite impor restrições ao modelo dado pela equação 60. Uma restrição útil para contornos de telhado de edifícios consiste em penalizar a energia externa de vértices candidatos, amostrados na vizinhança do telhado, mas que de fato não pertencem ao contorno sendo extraído. Este é o caso, por exemplo, de pontos de borda e quina resultantes da projeção de sombras do próprio telhado ou de objetos vizinhos a ele. O uso de restrições sobre estes pontos pode ajudar a evitar sua seleção como vértices representativos dos contornos de telhado.

Neste trabalho é utilizada uma restrição baseada em informações obtidas a partir do TIN para limitar a amostragem de pontos candidatos em regiões próximas ao telhado cujo contorno está sendo extraído. Esta restrição é aplicada no início do processo de extração sobre as quinas fornecidas pelo operador como pontos sementes iniciais. A posição destas quinas é avaliada de modo a verificar se as mesmas encontram-se próximas ao telhado: as quinas eventualmente posicionadas a uma distância maior que um dado limiar (por exemplo, 3m) são reposicionadas de maneira a torná-las mais próximas à região correspondente ao telhado. Isto garante que o processo de amostragem dos vértices candidatos inclua pontos representativos do contorno, ao mesmo tempo em que diminui a possibilidade de amostragem de vértices pertencentes a estruturas externas como, por exemplo, regiões adjacentes decorrentes da projeção de sombras do próprio edifício ou de objetos vizinhos, o que pode ajudar a diminuir a interferência negativa provocada por estes vértices no contorno final extraído.

Além dessa restrição de amostragem, é incluído um termo adicional de energia externa derivado a partir do TIN no modelo matemático dado pela equação 60. O objetivo é penalizar a energia externa de pontos de borda e quina amostrados no prolongamento virtual dos telhados, conforme ilustrado pela Figura 20. A penalização permite balancear a energia total do modelo, com o propósito de evitar a seleção de vértices resultantes da projeção de sombras ou pertencentes a objetos vizinhos aos telhados que, por muitas vezes, produzem valores de energia de borda e quina superiores aos vértices do contorno de telhado sendo extraído. O termo de energia externa adicional (denominado energia de desnível) é dado pela equação:

$$\Delta H(\bar{V}_i) = \begin{cases} |H_i - H_m| & \forall \bar{V}_i \notin \text{telhado} \\ 0 & \forall \bar{V}_i \in \text{telhado} \end{cases} \quad (61)$$

na qual H_i é a altitude do vértice \bar{V}_i e H_m é a altitude média do telhado sendo extraído.

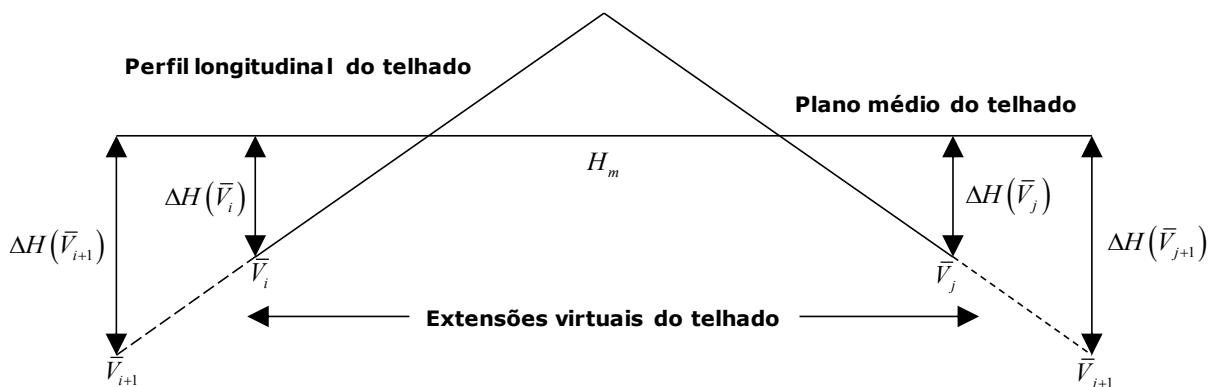


Figura 20 – Esquema ilustrativo do conceito de energia de desnível.

A inclusão do termo de energia de desnível na equação 60 resulta no modelo matemático de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto com termo adicional de energia externa obtida a partir do TIN e dado pela equação:

$$\bar{E}_2(\bar{V}) = \sum_{i=1}^n \left[\bar{E}_i(\bar{V}_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}), \bar{V}_i(E_i, N_i), \bar{V}_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1})) \right] + \sum_{i=1}^n \left[\varepsilon_{i-1} \Delta H(\bar{V}_{i-1}) + \varepsilon_i \Delta H(\bar{V}_i) + \varepsilon_{i+1} \Delta H(\bar{V}_{i+1}) \right] \quad (62)$$

na qual ε_{i-1} , ε_i e ε_{i+1} são funções de ponderação que controlam a influência da energia de desnível dos vértices \bar{V}_{i-1} , \bar{V}_i e \bar{V}_{i+1} no modelo, respectivamente.

A inclusão do termo de energia de desnível no modelo matemático de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto não altera sua estrutura em relação ao modelo inicial dado pela equação 60, uma vez que a função de energia resultante também é expressa como uma somatória de subfunções que dependem, cada uma, de três vértices relacionados consecutivamente. Desta forma, a equação 62 também pode ser representada em termos de um problema de otimização e utilizada para a extração direta de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto, a partir de uma única imagem aérea de alta resolução e um MDS derivado de dados de varredura a LASER, organizado na forma de uma estrutura TIN. A solução para este modelo é eficientemente encontrada através de uma estratégia de otimização global por PD, descrita a seguir.

3.4 Estratégias de otimização por programação dinâmica

Nesta seção é apresentada a estratégia de otimização por PD utilizada neste trabalho para obter a solução do modelo matemático de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto (equação 62). Uma vez que este modelo é uma extensão daquele dado pela equação 55 (modelo matemático no espaço-imagem), as estratégias utilizadas na solução de ambos apresentam características similares. Desta maneira, primeiramente é apresentada a estratégia utilizada para a extração no espaço-imagem (Seção 3.4.1) e em seguida a estratégia correspondente adotada para a extração no espaço-objeto (Seção 3.4.2).

3.4.1 Estratégias de otimização no espaço-imagem

As equações 55 e 60 apresentam estruturas nas quais seis variáveis estão simultaneamente inter-relacionadas. Dessa forma, uma das possíveis estratégias de otimização que podem ser utilizadas para obter suas soluções é o algoritmo de PD, apresentado no Capítulo 2. Na sequência, é apresentada a estratégia de otimização por PD utilizada neste trabalho para extrair polígonos representando os contornos de telhado de edifícios no espaço-imagem.

A inicialização do processo de extração é realizada pelo operador, que fornece um conjunto de pontos sementes (obtidos a partir da imagem) descrevendo uma aproximação inicial para o contorno de telhado de edifício a ser extraído. De uma forma geral, os pontos sementes devem ser posicionados na imagem nas vizinhanças das quinas do contorno de telhado. Não é necessário colocar pontos sementes ao longo dos lados do contorno, uma vez que estes podem ser preditos levando em conta que estes lados são

retilíneos. O polígono inicial fornecido no início do processo de extração é descrito na imagem por segmentos retos definidos por pares de pontos sementes consecutivos, conforme ilustrado pela Figura 21.

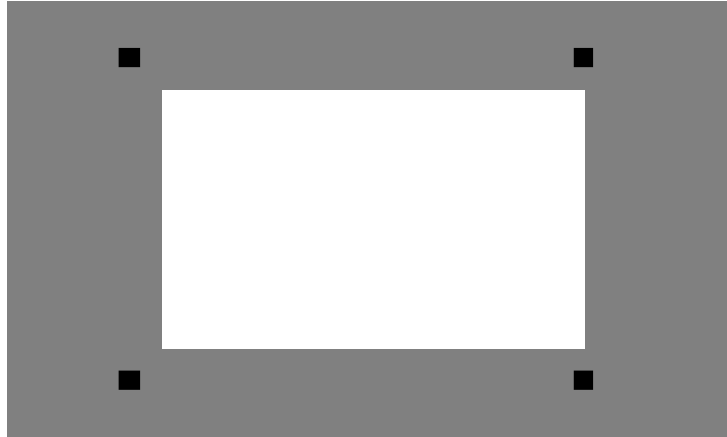


Figura 21 – Pontos sementes descrevendo o contorno inicial aproximado requerido pelo método de extração.

A Figura 22 mostra como é construído o espaço de busca dos vértices candidatos à representação do contorno de telhado a ser extraído. Têm-se dois tipos de pontos que geram os polígonos candidatos à solução ótima (polígono ótimo): pontos representativos dos lados e correspondentes à descontinuidade do tipo borda degrau; e pontos representativos das quinas e correspondentes à descontinuidade do tipo quina. A princípio, parece simples determinar as quinas e uni-las para formar o polígono de contorno de telhado. Entretanto, podem ser detectadas falsas quinas e até mesmo não existirem quinas para um dado canto de contorno de telhado. Este fato está diretamente relacionado à qualidade da imagem aérea de entrada, uma vez que em regiões de baixo contraste o operador de detecção de quinas pode não detectar as quinas existentes; por outro lado, este operador pode também detectar falsas quinas em regiões afetadas pela projeção de sombras ou por ruídos presentes na imagem. Daí a importância de se incluir pontos de lados de contorno para prover suporte à determinação de quais são as quinas corretas.

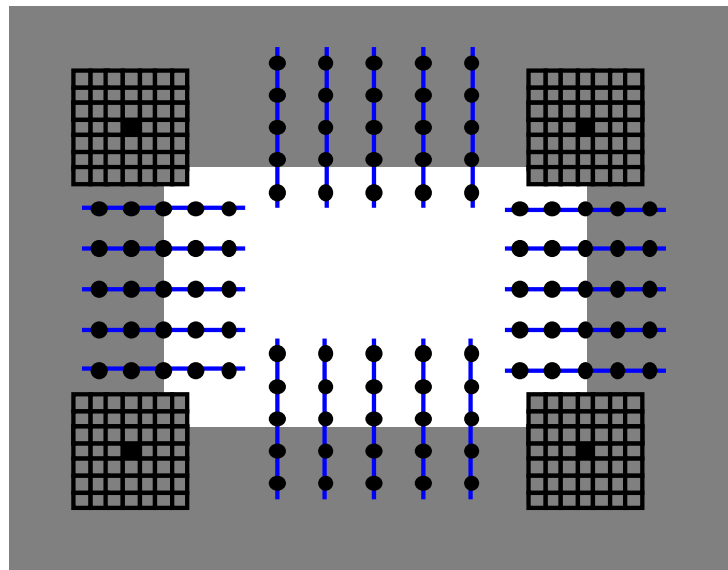


Figura 22 – Construção do espaço de busca para amostragem na imagem dos pontos candidatos à representação do contorno de telhado de edifício sendo extraído.

Quanto aos pontos candidatos a representar um canto de edifício, um ponto de referência deve ser fornecido pelo operador e, os demais, são determinados por um algoritmo de detecção de quinas sobre uma pequena janela de busca definida no espaço-imagem e delimitada em torno do respectivo ponto semente (Figura 22). As dimensões dessa janela devem ser suficientes para que a mesma contenha a quina correta do edifício. O detector de quinas utilizado é o de Harris (HARRIS e STEPHENS, 1988) e as quinas com melhor resposta são armazenadas, juntamente com seus respectivos ângulos de deflexão δ_i . O armazenamento de múltiplas quinas é necessário por dois motivos: primeiro pelo simples fato de poder haver mais de uma quina na janela; e segundo pela possibilidade da quina com melhor resposta ser uma falsa positiva. Quanto aos pontos candidatos a representar pontos de lados de contorno de edifício, os mesmos são amostrados regularmente ao longo de seções transversais aos lados de contornos de edifício definidos por pares de pontos sementes (Figura 22). É importante notar que as seções transversais também são amostradas regularmente ao longo dos lados dos contornos dos edifícios. Como são centradas em pontos dos lados do contorno definido pelos pontos sementes (polígono inicial), não existe preferência de busca em um ou em outro lado. A amostragem de vértices candidatos à representação do contorno de telhado é realizada sobre a imagem aérea, resultando em conjuntos de vértices candidatos a serem selecionados posteriormente através do algoritmo de PD.

Para se ter uma ideia da dimensão do espaço de busca resultante do processo de amostragem, supor que cada quina de edifício possua m candidatas. Supor também que, por simplicidade, em cada seção transversal aos lados de contorno de edifício sejam

amostrados m pontos candidatos. Sendo n a soma entre o número de pontos sementes e o número total de seções transversais amostradas, existirão no espaço de busca m^n polígonos. O polígono ótimo é aquele que minimiza a função de energia dada na equação 55.

A solução do problema de otimização por PD é encontrada em três etapas:

- 1) **Refinamento do polígono inicial definido por pontos sementes:** a estratégia descrita acima é aplicada para refinar o polígono inicial (definido pelos pontos sementes) fornecido no início do processo de extração. A resolução típica (distância entre pontos amostrados na imagem) adotada para as seções transversais é de 1 pixel. Já o número de elementos nestas seções deve ser compatível com a qualidade do polígono inicial. No exemplo ilustrativo apresentado na Figura 23, os pontos destacados em vermelho correspondem ao conjunto de vértices obtidos no processo de otimização por PD.

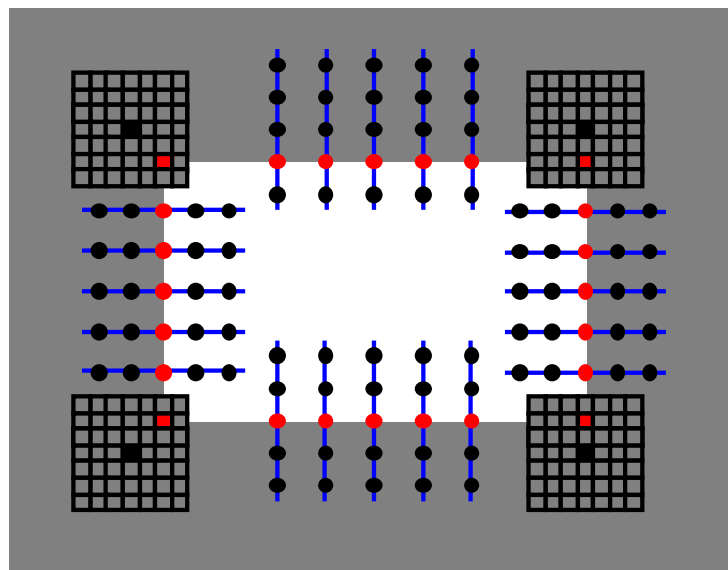


Figura 23 – Otimização do contorno inicial através do algoritmo de PD.

- 2) **Refinamento da primeira solução:** como os pontos obtidos ao longo dos lados do contorno podem estar afetados por anomalias locais provenientes da imagem aérea (por exemplo, pixels espúrios decorrentes de ruídos presentes na imagem) que produzem irregularidades locais no contorno, um método robusto de regressão pode ser utilizado para obter retas que melhor modelam os lados do contorno de telhado do edifício. O método de regressão robusta estima os parâmetros da equação da reta que modela cada um dos lados do

contorno de telhado, a partir dos pontos de borda cuja direção principal é igual a moda de todos os pontos selecionados pelo algoritmo de PD para um dado lado. Para tanto, a seguinte estratégia é utilizada: a) os parâmetros das equações das retas que representam os lados do contorno são estimados através de um ajuste por mínimos quadrados, a partir dos pontos de borda modais; b) os pontos modais cujas distâncias à reta estimada sejam maiores que o desvio-padrão (σ) das distâncias de todos esses pontos à reta considerada são eliminados do conjunto inicial de pontos modais; c) os parâmetros refinados da equação de cada uma das retas correspondentes aos lados do contorno são então reestimados a partir de seu respectivo conjunto de pontos modais remanescentes. Na sequência, com base nestas retas, determina-se por intersecção as novas quinas, as quais farão o papel de pontos sementes para uma nova otimização da função de energia representativa do contorno de telhado do edifício, conforme ilustra a Figura 24.

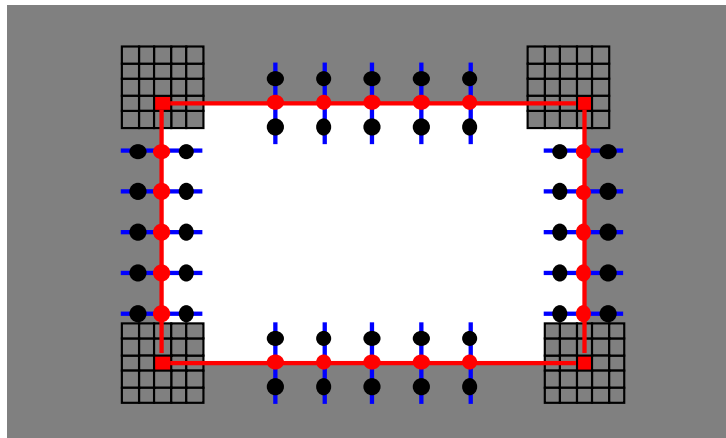


Figura 24 – Refinamento da primeira solução com restrição do espaço de busca.

- 3) **Obtenção da solução final:** Uma nova otimização por PD é indicada pelos seguintes motivos: as retas determinadas por regressão podem ainda estar afetadas por anomalias não modeladas existentes ao longo dos lados do contorno; seções transversais de busca com resolução bem melhor (0,5 pixel, por exemplo) são adotadas para melhorar a qualidade final das retas representando lados de contorno, melhorando também as posições finais dos vértices (quinas) do polígono de telhado; os comprimentos das seções transversais de busca e as dimensões das

janelas de busca para as novas quinas são fixadas iguais ao desvio-padrão (σ) determinado anteriormente, tornando a solução de otimização menos sensível às eventuais anomalias existentes na imagem aérea nas adjacências do contorno de telhado. Após o novo processo de otimização, determinam-se novamente as retas por regressão robusta e, a partir destas, as posições finais das quinas dos edifícios. O polígono final representativo do contorno de telhado é definido em função dos vértices de borda e quina refinados nesta etapa, conforme ilustra a Figura 25.

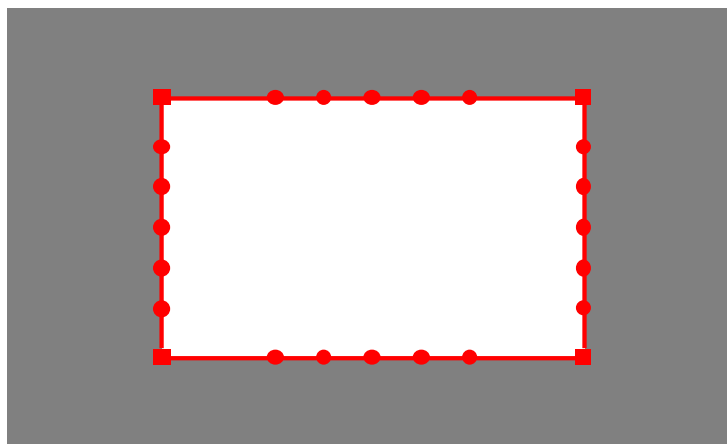


Figura 25 – Contorno final extraído para o telhado de edifício.

3.4.2 *Estratégia de otimização no espaço-objeto*

Nesta seção é apresentada a estratégia de otimização baseada no algoritmo de PD para a extração direta de contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto. Primeiramente é apresentada a estratégia utilizada para separar os telhados de edifícios a partir do TIN. Em seguida é descrita a estratégia de otimização por PD utilizada para extrair os contornos de telhado diretamente no espaço-objeto.

3.4.2.1 Estratégia de separação dos telhados a partir do TIN

O método de extração no espaço-objeto proposto neste trabalho requer inicialmente a identificação e separação das regiões correspondentes aos telhados de edifícios no TIN. Estas regiões são definidas por conjuntos de faces do TIN, a partir das quais é realizada a amostragem das coordenadas tridimensionais dos vértices candidatos à representação dos contornos de telhado no espaço-objeto. Esta etapa prévia à extração dos contornos de telhado é realizada através de uma estratégia baseada na suposição de que os

telhados de edifícios em um TIN são representados por conjuntos de faces da rede de triângulos que possuem orientação uniforme no espaço-objeto.

A separação das faces que representam as regiões correspondentes aos telhados é realizada através de uma análise de componentes conexos aplicada às faces da triangulação e posterior limiarização dos componentes conexos rotulados. Primeiramente, as faces com inclinação superior a 45° em relação à horizontal são excluídas da análise através da comparação de seus vetores normais $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ unitários com o vetor canônico $\vec{k} = (0, 0, 1)$. Esta etapa leva em conta a suposição de que a inclinação da maioria das faces de telhados de edifícios é igual ou inferior a 45° em relação ao plano horizontal da base do telhado. Desta forma, as faces da triangulação que permanecem como candidatas à definição dos componentes conexos que representam as regiões correspondentes aos telhados de edifícios são aquelas cujos vetores normais unitários se apresentam na forma $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z \geq 1/\sqrt{2})$. Na sequência, é aplicada a análise de componentes conexos, a fim de segmentar (rotular) as faces remanescentes da triangulação em regiões candidatas à representação dos telhados de edifícios. O atributo utilizado para definir os componentes conexos de triângulos é a altura média das faces analisadas, ou seja, aquelas que atendem a condição inicial (com inclinação em relação ao plano horizontal menor ou igual a 45°). O algoritmo que realiza a análise de componentes conexos baseia-se nas seguintes etapas:

- 1) Inicialmente todas as faces remanescentes da triangulação são percorridas e rotuladas com o valor -1 , o que indica que os componentes conexos não foram ainda definidos;
- 2) Uma estrutura para armazenar informações de classes de equivalência é definida. As classes de equivalência contêm informações de cada componente conexo presente na triangulação, além de um rótulo e uma lista de identificadores das faces que definem cada componente conexo. Estas informações (atributos), utilizadas na definição dos componentes conexos, correspondem à altura média e desvio-padrão do conjunto de faces que representa cada um deles. Para decidir se uma determinada face pertence a um determinado componente conexo, é utilizado o teste de similaridade de médias (MIKHAIL e ACKERMAN, 1983) ao nível de significância de 5%, para definir se a altura média da face analisada

é estatisticamente igual à altura média do componente conexo em questão;

- 3) Nesta etapa, as faces remanescentes são percorridas para a rotulação e o estabelecimento das classes de equivalência (componentes conexos) da triangulação. A partir da primeira face remanescente é criada a classe de equivalência inicial (primeiro componente conexo) da triangulação. Então, cada uma de suas faces vizinhas é avaliada de modo a verificar se as mesmas pertencem à classe de equivalência atual. Em caso positivo, a classe é atualizada: além da rotulação da face em análise, os valores dos atributos utilizados na análise são atualizados e o identificador da face é adicionado à lista que define a classe atual. Para as demais faces, primeiramente é realizada uma verificação intermediária para testar se a face atual pertence a uma das classes de equivalência já definidas. Se a face não pertencer a nenhuma delas, uma nova classe de equivalência é criada. Em seguida, a análise das faces vizinhas é novamente realizada. O procedimento é repetido até a varredura completa das faces remanescentes da triangulação, quando é concluída a rotulação dos componentes conexos.

Após a rotulação dos componentes conexos no TIN, é aplicada uma operação de limiarização baseada na altura média de cada componente conexo resultante, a fim de separar as regiões altas (correspondentes a telhados ou planos de telhados de edifícios) das demais regiões (correspondentes a outros objetos) do TIN analisado. Esta etapa depende da intervenção do operador, que decide com base nos atributos de cada componente conexo resultante (altura média e número de faces) quais deles correspondem aos conjuntos de faces que representam os telhados dos edifícios. A Figura 26 ilustra alguns exemplos das regiões obtidas pela estratégia descrita.

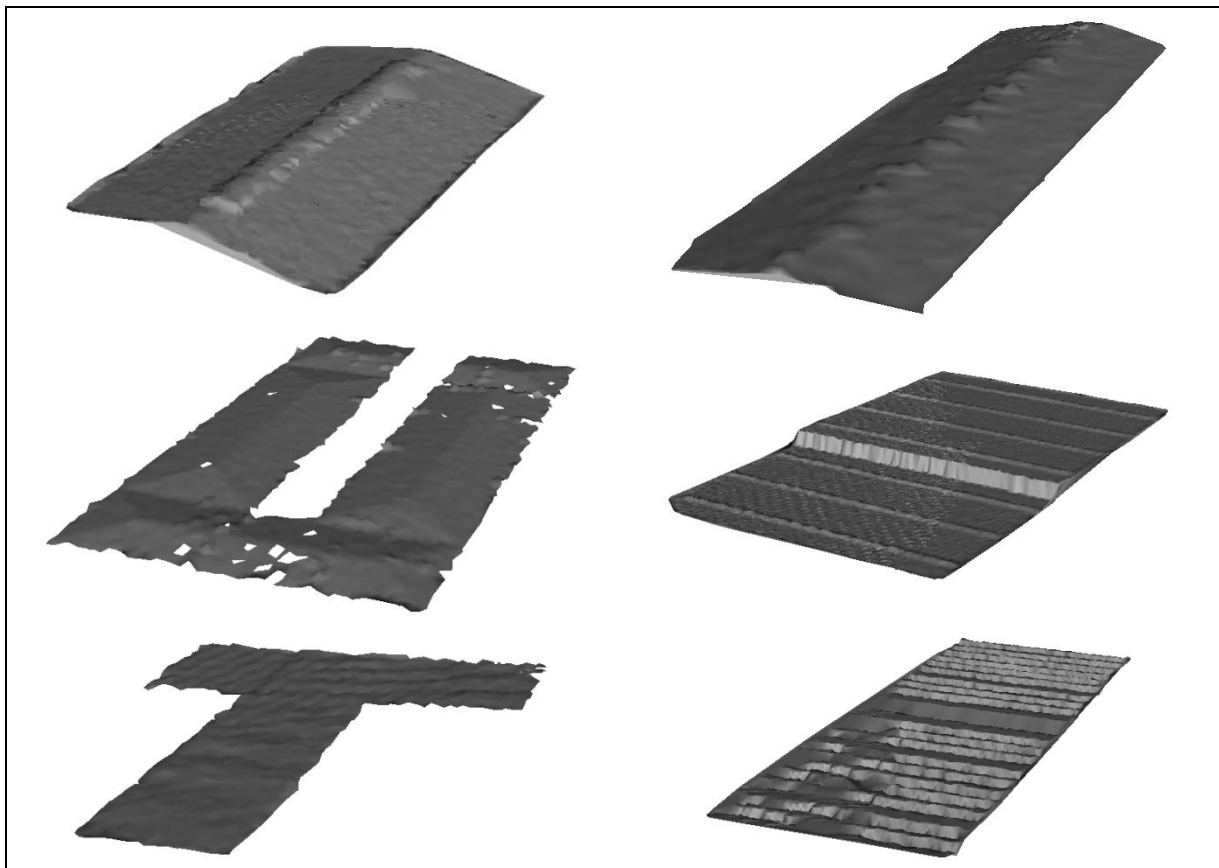


Figura 26 – Regiões de um TIN correspondentes a telhados de edifícios.

3.4.2.2 Estratégia de otimização para extração dos contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto

A estratégia de otimização da função objetivo que representa os contornos de telhado de edifícios no espaço-objeto é similar à utilizada no espaço-imagem. A principal diferença refere-se à definição do espaço de busca no qual é realizada a amostragem dos vértices candidatos à representação do contorno de telhado.

No método de extração no espaço-objeto, o espaço de busca é estabelecido de maneira dual, ou seja, simultaneamente na imagem aérea e no TIN. Isto é necessário, uma vez que parte das informações referentes à energia externa (de borda e quina) do modelo matemático de contornos de telhado é obtida a partir dos dados da imagem aérea, enquanto as coordenadas dos vértices candidatos são amostradas sobre as faces do TIN que representam o telhado do edifício sendo extraído. Estas coordenadas são amostradas a partir de um conjunto de segmentos conectados de retas tridimensionais, que definem o espaço de busca em seções aproximadamente transversais ao contorno corrente do telhado do edifício. No início do processo de extração, este contorno é descrito pelos pontos sementes fornecidos pelo operador projetados no plano definido pela altitude média obtida a partir do segmento do TIN

correspondente ao telhado (plano médio do telhado). Na etapa de refinamento, o contorno corrente é aquele obtido na etapa inicial do processo de extração, seguindo o mesmo esquema adotado na estratégia de otimização no espaço-imagem.

O estabelecimento do espaço de busca para o algoritmo de PD é definido em duas etapas e realizado da seguinte forma:

- 1) **Amostragem dos pontos candidatos à representação dos lados do contorno de telhado:** Os pontos correspondentes aos lados do contorno são amostrados com base em um procedimento definido pelos seguintes estágios:
 - Os pontos extremos de uma seção de busca transversal ao contorno corrente (no espaço-imagem) são inicialmente projetados sobre o plano médio do telhado através das equações de colinearidade inversas. Os pontos A e B resultantes da projeção, juntamente com o centro perspectivo (CP) da imagem aérea definem um plano π no espaço-objeto, conforme ilustra a Figura 27;
 - A intersecção do plano π com as faces planares do TIN que representam o telhado define um conjunto de segmentos conectados de retas tridimensionais, que são utilizados como suporte para a amostragem dos pontos candidatos à representação do contorno de telhado no espaço-objeto. É importante lembrar que a intersecção do plano π com as k faces do segmento do TIN correspondente ao telhado produz k segmentos de retas tridimensionais. Entretanto, nesta etapa são selecionadas apenas aquelas limitadas no intervalo definido pelos pontos A e B obtidos no estágio anterior (Figura 27);

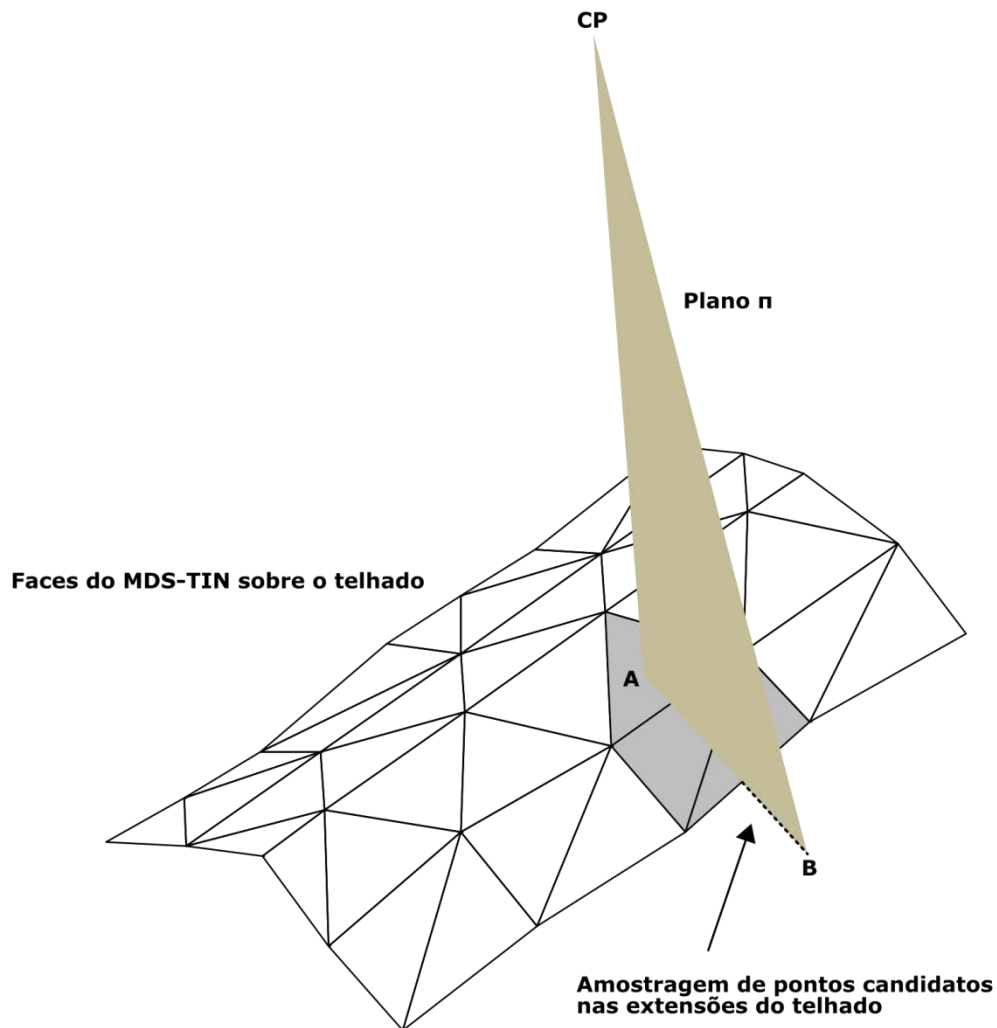


Figura 27 – Exemplo ilustrativo da definição e geração do espaço de busca de uma seção para amostragem de pontos candidatos à representação do contorno de telhado no espaço-objeto.

- Com base nos segmentos de reta selecionados como suporte, são amostrados vértices com coordenadas (E, N, H) em intervalos regularmente espaçados (correspondentes à resolução espacial da imagem) e em ambos os lados do contorno corrente, da mesma maneira que a amostragem realizada na estratégia de otimização adotada no espaço-imagem. Este procedimento garante a amostragem de vértices candidatos além dos limites dos telhados no TIN, conforme ilustrado através da linha tracejada destacada na Figura 27. Isto é importante e necessário, uma vez que a acurácia dos limites de telhados é reduzida em um TIN derivado de dados de varredura a LASER. Além disso, os vértices candidatos amostrados além dos limites dos telhados no TIN são obtidos de forma a seguir a

inclinação do telhado, o que possibilita definir acuradamente o polígono que descreve seu contorno através dos termos de energia externa (de borda e quina) obtidos a partir da imagem aérea e, ao mesmo tempo, ajuda a descartar falsos positivos relativos a contornos correspondentes à projeções de sombras, através do termo de energia externa de desnível obtido a partir do TIN (equação 61).

- 2) **Amostragem dos pontos candidatos à representação das quinas do contorno de telhado:** Os pontos de quina são amostrados da mesma maneira que a utilizada na estratégia de otimização utilizada no espaço-imagem. Entretanto, na estratégia de solução no espaço-objeto, os pontos com característica de quina e amostrados inicialmente na imagem são projetados para o espaço-objeto, de modo a obter suas coordenadas (E, N, H) . Nesta etapa, para cada ponto de quina amostrado nas janelas de busca da imagem, é necessário encontrar iterativamente (no segmento do TIN correspondente ao telhado) a face que contém sua projeção no espaço-objeto. Caso não seja encontrada uma face correspondente, é realizada a intersecção da reta definida pela projeção da quina sobre o terreno e pelo CP da imagem aérea com o plano representado pela face mais próxima encontrada no processo iterativo de busca.

A amostragem dos pontos de quina produz conjuntos de k vértices para cada janela de busca definida na imagem. A combinação destes conjuntos de vértices com aqueles (de dimensão n) amostrados ao longo das seções aproximadamente transversais ao telhado define o espaço de busca dos vértices candidatos à representação do contorno de telhado no espaço-objeto. Supondo que $c + e = m$ seja a soma do número de conjuntos de vértices de quina (c) e borda (e) e que (por simplificação) $k = n$, existirão m^n polígonos candidatos à representação do contorno de um telhado.

A partir do espaço de busca gerado na amostragem dos vértices de borda e quina é aplicado o algoritmo de otimização por PD para encontrar o conjunto de vértices ótimos, ou seja, aqueles que produzem um valor mínimo global de energia para o modelo matemático dado na equação 62. A estratégia de PD é semelhante à adotada no espaço-imagem. A energia interna do modelo matemático de contornos é calculada a partir das

coordenadas (E, N) dos vértices candidatos, enquanto a energia externa é derivada a partir dos dados da imagem (termos de energia correspondentes à pontos de borda e quina) e do TIN (termo de energia de desnível).

De modo a eliminar eventuais anomalias existentes no primeiro contorno extraído, são utilizadas regressões lineares baseadas nas coordenadas (E, N) dos pontos correspondentes aos lados deste contorno, da mesma maneira que o procedimento adotado no espaço-imagem. Este procedimento permite o refinamento das quinas do telhado e a definição de um contorno atualizado, a partir do qual é realizado o refinamento do contorno de telhado, através da amostragem de novos conjuntos de pontos de borda e quina (descrita nas etapas 1 e 2 desta seção) e aplicação da estratégia de otimização por PD.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta a avaliação experimental do método de extração de contornos de telhado de edifícios desenvolvido neste trabalho. A Seção 4.2 traz detalhes a respeito dos procedimentos metodológicos adotados na avaliação experimental, com a especificação dos dados utilizados na realização dos testes, aspectos computacionais relacionados à implementação do método, formas de avaliação dos resultados e organização dos experimentos realizados, que são apresentados em maiores detalhes na Seção 4.3.

4.2 Procedimentos metodológicos

4.2.1 Características dos dados utilizados

Os dados utilizados nos experimentos realizados consistem basicamente de:

- Imagens aéreas de alta resolução em formato digital, obtidas a partir da digitalização de diapositivos coloridos originais na escala 1:10.000, tomados com a câmara WILD RC-10. As imagens possuem dimensão de 9728 por 9728 pixels e resolução espacial aproximada de 0,25m;
- Parâmetros de orientação interior das imagens aéreas, obtidos a partir do certificado de calibração da câmara utilizada na aquisição das imagens;
- Um conjunto de pontos de apoio fotogramétricos com coordenadas (E, N, H) , utilizados na estimação dos parâmetros de orientação exterior das imagens aéreas;
- Uma malha irregular de pontos de elevação com coordenadas (E, N, H) , obtidos a partir de dados coletados por um sistema de varredura a LASER aerotransportado. Esta malha contém 8.593.332 pontos de elevação, obtidos a partir da combinação dos dados do primeiro e último pulsos de retorno coletados pelo sistema.

4.2.2 *Aspectos computacionais*

A implementação das estruturas de dados e rotinas necessárias ao algoritmo do método de extração desenvolvido foi realizada em linguagem C++ no ambiente de desenvolvimento integrado Microsoft Visual Studio 2005. O compilador utilizado possui ferramentas para a construção de aplicativos gráficos executados no sistema operacional Microsoft Windows. Estas ferramentas foram utilizadas na implementação de um aplicativo gráfico, de modo a facilitar a interação do operador com o sistema e a entrada dos dados necessários ao método de extração e, conseqüentemente, a realização dos experimentos. O aplicativo dispõe de ferramentas básicas para a medição dos contornos iniciais requeridos pelo método de extração, além da extração dos contornos de telhado utilizados como referência na análise numérica dos contornos extraídos.

Para a geração dos modelos digitais de superfície em formato TIN a partir da malha de pontos de elevação derivados de dados de varredura a LASER, bem como na implementação das rotinas relacionadas à estratégia utilizada na separação dos telhados de edifícios a partir do TIN, foram utilizados algoritmos e estruturas de dados da biblioteca de classes CGAL (*Computer Geometry Algorithms Library*), também codificada em linguagem C++.

4.2.3 *Formas de avaliação dos resultados*

Os resultados obtidos nos experimentos descritos neste capítulo são avaliados através de duas formas: a primeira refere-se basicamente à inspeção visual dos contornos de telhado extraídos sobrepostos na imagem aérea, o que permite avaliar o desempenho do método de extração de forma qualitativa ao indicar se a extração de um contorno de telhado foi bem sucedida ou não. A segunda forma de avaliação é quantitativa e baseada na análise de parâmetros numéricos de qualidade, estimados a partir da comparação dos contornos de telhado extraídos com contornos de referência, considerados de melhor qualidade e obtidos através de procedimentos de extração manuais.

Os contornos de telhado de referência no espaço-imagem são obtidos a partir da identificação visual e medição manual das coordenadas de seus vértices na imagem aérea digital. Já os contornos de referência no espaço-objeto são obtidos automaticamente a partir dos contornos de referência no espaço-imagem e do TIN correspondente à área de realização do experimento, através do processo de monorrestituição fotogramétrica. É importante ressaltar, entretanto, que os contornos de referência obtidos através deste

procedimento não são a melhor alternativa em termos de qualidade geométrica para a comparação com os contornos extraídos no espaço-objeto. Isto ocorre porque os limites dos telhados de edifícios geralmente não são bem definidos nos dados de varredura a LASER, uma vez que não existe a garantia de que pontos de elevação sejam amostrados exatamente sobre as extremidades desses objetos. Conseqüentemente, o processo de monorrestituição pode produzir vértices que não pertencem de fato ao contorno de telhado de referência para um edifício, produzindo inconsistências na comparação, o que degrada a acurácia e reduz a confiabilidade dos parâmetros de qualidade estimados a partir dele. Para minimizar este problema, são utilizadas no processo de monorrestituição as regiões correspondentes a telhados de edifícios e segmentadas a partir do TIN como base para a obtenção dos contornos de referência no espaço-objeto. Desta forma, é possível impor restrições ao processo de monorrestituição de modo a evitar a seleção de vértices sobre o terreno, uma vez que apenas as faces da triangulação correspondentes a um telhado são utilizadas na obtenção do contorno de telhado de referência. Para casos em que não é possível encontrar a face do TIN correspondente a um vértice do contorno de telhado, é utilizada a altura média do triângulo cujo centroide se encontra mais próximo ao referido vértice.

Independentemente do processo utilizado, é importante ressaltar que a restituição fotogramétrica convencional a partir de pares estereoscópicos de imagens aéreas devidamente orientadas é a melhor opção para a extração de contornos de referência no espaço-objeto em termos de acurácia e qualidade geométrica.

Conforme mencionado anteriormente, os parâmetros de qualidade nos quais se baseia a análise numérica dos resultados obtidos nos experimentos apresentados neste capítulo são estimados a partir da comparação numérica dos contornos de telhado extraídos com contornos de referência correspondentes. Os parâmetros calculados referem-se à completeza (C_1), correção (C_2) e *RMSE* (*root mean square error*). Os parâmetros de completeza e correção são estimados a partir das áreas dos polígonos que descrevem, respectivamente, um contorno extraído e um contorno de referência. São dados, respectivamente, pelas equações (HEIPKE *et. al*, 1997)

$$C_1 = \frac{A_{E \cap R}}{A_R} \cdot 100\%, \quad (63)$$

$$C_2 = \frac{A_{E \cap R}}{A_E} \cdot 100\%, \quad (64)$$

nas quais:

- $A_{E \cap R}$ é a área do polígono resultante da intersecção entre os polígonos que descrevem os contornos de telhado extraído e de referência, respectivamente;
- A_R é a área do polígono correspondente ao contorno de telhado de referência;
- A_E é a área do polígono correspondente ao contorno de telhado extraído.

A Figura 28 ilustra o conceito relacionado à completeza e à correção entre dois objetos poligonais. Os polígonos preenchidos em vermelho e azul representam, respectivamente, o polígono extraído e o polígono de referência. A área de intersecção entre ambos é destacada em verde. Conforme é possível observar, quanto maior a área de intersecção entre os polígonos, maior será a correspondência entre o polígono extraído e o polígono de referência.

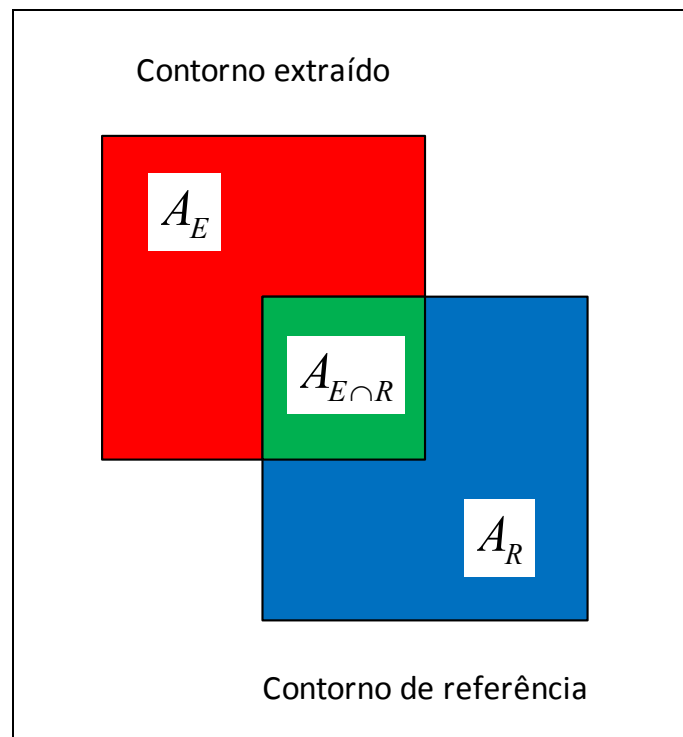


Figura 28 – Completeza e correção entre dois objetos poligonais.

O *RMSE* é calculado em função das distâncias entre os vértices que descrevem, respectivamente, um contorno extraído e um contorno de referência. Este parâmetro fornece uma estimativa da distância média entre tais vértices e é calculado a partir da equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2}, \quad (65)$$

na qual d_i é a distância entre o vértice i do contorno extraído e o segmento (definido pela conexão de dois vértices) mais próximo do contorno de referência e n é o número total de vértices do contorno extraído.

4.2.4 Organização dos experimentos realizados

Na sequência deste capítulo são apresentados os resultados de cinco experimentos realizados. Estes experimentos foram organizados de modo a avaliar o desempenho do método em duas situações principais:

- 1) Extração de contornos de telhado de edifícios isolados na imagem aérea, que apresentam pouca ou nenhuma interação com objetos vizinhos como árvores e telhados de outros edifícios. Esta situação caracteriza casos de menor frequência de ocorrência em áreas urbanas, nos quais os edifícios apresentam usos variados e, de modo geral, maiores dimensões e maior variação nas formas de seus telhados;
- 2) Extração de contornos de telhado de edifícios presentes em quadras urbanas de uso predominantemente residencial, onde existe maior interação dos telhados com objetos vizinhos (e.g. árvores e telhados de outros edifícios). Esta situação caracteriza o caso mais comum de frequência de ocorrência em áreas urbanas, onde a maioria dos telhados de edifícios é representada pela união de duas ou mais faces planas inclinadas no espaço tridimensional.

Os experimentos apresentados são organizados em dois grupos. O primeiro grupo abrange os dois primeiros experimentos apresentados, nos quais são utilizados os dois métodos de extração, a fim de comparar os contornos de telhado de edifícios extraídos no

espaço-objeto com os correspondentes extraídos no espaço-imagem. O objetivo principal desta comparação é verificar se o método de extração no espaço-objeto fornece melhores resultados que o correspondente método de extração no espaço-imagem e, desta forma, torna-se vantajoso para a tarefa de extração dos contornos de telhado de edifícios. O segundo grupo utiliza apenas o método de extração no espaço-objeto para a obtenção dos contornos de telhado e abrange os demais experimentos apresentados.

4.2.5 *Procedimentos gerais adotados na realização dos experimentos*

A realização de um experimento requer a execução prévia das seguintes etapas:

- Identificação na imagem aérea da área de teste contendo os edifícios de interesse, cujos contornos de telhado serão extraídos;
- Medição manual dos contornos de telhado aproximados para estes edifícios;
- Geração do TIN correspondente à área de teste e separação dos telhados de edifícios: Nesta etapa é selecionado um conjunto de pontos de elevação derivado de dados de varredura a LASER, a partir dos quais é gerado o TIN correspondente à área de realização do experimento. Em seguida é utilizada a estratégia descrita na Seção 3.4.2.1 para separar as regiões correspondentes aos telhados dos edifícios, que são descritas por conjuntos de faces da triangulação que representa o TIN.

Após a realização destas etapas, para cada edifício a ser extraído no espaço-objeto, são fornecidos ao método seu contorno inicial aproximado e a região correspondente ao seu telhado, obtida a partir da segmentação do TIN. Para a extração no espaço-imagem é necessário apenas fornecer a aproximação inicial para o contorno de telhado a ser extraído.

4.3 *Experimentos realizados*

De modo a avaliar o método desenvolvido, foram realizados vários experimentos utilizando dados reais. Na sequência, é apresentada a descrição e análise dos resultados obtidos para cinco destes experimentos.

4.3.1 *Experimento 1*

Esta seção descreve o primeiro experimento realizado para avaliar o método desenvolvido. O objetivo deste experimento foi aferir o desempenho do método de extração no espaço-imagem e no espaço-objeto e comparar os resultados obtidos por ambos, a fim de mostrar possíveis vantagens do método de extração no espaço-objeto, que incorpora informações tridimensionais sobre os edifícios provenientes do TIN. Para a realização deste experimento, foi selecionada uma área na imagem aérea correspondente a uma quadra urbana contendo edificações típicas de uso residencial. Os pontos de elevação provenientes dos dados de varredura a LASER correspondentes à área de realização do experimento foram selecionados a partir da malha irregular original. A densidade média de pontos de elevação nessa região é de aproximadamente 3 a 4 pontos/m². Uma característica importante desta área é a proximidade entre os edifícios presentes, existindo inclusive conexão entre os telhados dos mesmos em alguns casos. É importante ressaltar que na realização deste experimento foram utilizados os mesmos contornos iniciais aproximados nos dois métodos de extração avaliados, de modo a tornar válida a comparação dos contornos extraídos.

Os contornos de telhado extraídos por ambos os métodos foram armazenados para posterior avaliação numérica e sobrepostos na imagem aérea para inspeção visual. A Figura 29 apresenta o segmento da imagem aérea contendo os contornos obtidos pelo método de extração no espaço-objeto. Os contornos de telhado extraídos no espaço-imagem foram obtidos através da utilização do método de extração correspondente, a partir dos respectivos contornos de telhado aproximados. Na Figura 30 são apresentados os contornos de telhado extraídos no espaço-imagem sobrepostos na imagem área de entrada.



Figura 29 – Contornos de telhado extraídos no espaço-objeto no experimento 1.



Figura 30 – Contornos de telhado extraídos no espaço-imagem no experimento 1.

A análise visual dos resultados obtidos não aponta grandes diferenças entre os contornos extraídos por ambos os métodos. É possível verificar a ocorrência de irregularidades em alguns contornos, principalmente nas regiões dos vértices de quina, decorrentes de fatores como a baixa definição de alguns destes vértices na imagem aérea e a interação dos edifícios com objetos vizinhos. Outro fator que afeta diretamente a qualidade dos resultados está relacionado à definição das bordas na imagem e à presença de ruídos nas regiões onde é realizada a amostragem dos vértices candidatos à representação do contorno de telhado sendo extraído. Algumas destas irregularidades são destacadas nas Figuras 29 e 30. Também é possível notar que não foram extraídos contornos para alguns dos telhados presentes na área de teste. Estes correspondem àqueles para os quais a estratégia de separação de telhados não foi capaz de segmentar estes objetos a partir do TIN. A principal causa para este fato se deve à baixa densidade de pontos de elevação na área de realização do experimento, o que impossibilita representar acuradamente esses telhados através de conjuntos de faces do TIN.

A Figura 31 apresenta os contornos de telhado (sobrepostos na imagem aérea de entrada) utilizados como referência para a comparação numérica dos resultados obtidos neste experimento. Os parâmetros de qualidade estimados nesta análise são apresentados pela Tabela 2. Estes valores se referem à completeza, correção e ao RMSE para cada contorno de telhado extraído por ambos os métodos. Os valores de RMSE para os contornos extraídos no espaço-imagem foram transformados de pixels para metros levando em conta a resolução espacial da imagem aérea utilizada.

A análise dos valores obtidos indica melhora de alguns contornos de telhado extraídos no espaço-objeto em relação aos correspondentes extraídos no espaço-imagem. Dentre os 29 contornos avaliados, 13 apresentaram melhores valores de completeza e 14 melhores valores de correção. Em relação ao RMSE, a acurácia foi superior para 16 destes contornos. Entretanto, os valores dos parâmetros obtidos na análise numérica não permitem afirmar a superioridade do método de extração no espaço-objeto sobre o método no espaço-imagem, uma vez que menos da metade dos contornos extraídos no espaço-objeto apresentaram melhoria em relação aos extraídos no espaço-imagem, conforme apontam os indicadores de qualidade. Além disso, os valores mínimos, médios e máximos destes parâmetros indicam equivalência entre os métodos. Com base nos resultados é possível afirmar que os métodos fornecem resultados equivalentes em áreas urbanas densas onde existe grande interação entre os objetos de interesse (edifícios neste caso) e demais presentes na cena.



Figura 31 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 1.

Tabela 2 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos contornos de telhado obtidos pelos dois métodos de extração avaliados no experimento 1.

Contorno	Espaço-imagem			Espaço-objeto		
	C ₁ (%)	C ₂ (%)	RMSE(m)	C ₁ (%)	C ₂ (%)	RMSE(m)
1	96,9	92,8	0,346	97,2	92,0	0,500
2	90,6	89,0	0,708	94,1	91,0	0,557
3	99,4	78,7	0,511	99,5	80,6	0,448
4	90,3	92,6	0,576	96,3	82,7	0,560
5	97,1	93,4	0,386	98,2	93,0	0,641
6	87,2	81,1	0,763	89,9	78,7	0,760
7	98,9	91,2	0,298	98,3	89,2	0,294
8	99,4	88,9	0,447	99,4	88,2	0,549
9	99,1	89,3	0,390	97,8	92,0	0,523
10	100,0	80,5	0,496	98,6	82,1	0,527
11	100,0	75,3	0,790	99,2	76,3	0,835
12	100,0	59,5	0,980	100,0	66,4	0,496
13	97,7	89,9	0,359	99,1	88,4	1,770
14	87,7	89,2	0,910	88,2	94,7	0,782
15	100,0	78,3	0,513	99,8	78,1	0,699
16	99,4	85,2	0,727	100,0	84,3	0,572
17	96,0	83,6	0,606	96,2	82,9	0,459
18	96,7	85,2	0,576	98,0	85,8	0,548
19	98,0	83,6	0,500	98,8	79,7	0,493
20	94,4	96,2	0,385	97,8	93,1	0,312
21	98,2	92,9	0,315	96,7	86,1	0,411
22	97,2	87,3	0,345	87,5	91,9	0,508
23	99,4	78,7	0,511	99,8	78,3	0,419
24	94,0	84,7	0,533	97,7	84,8	1,023
25	97,2	75,1	0,808	98,5	71,6	0,981
26	88,1	96,1	0,763	88,3	93,2	0,773
27	98,2	88,2	0,567	96,7	93,7	0,373
28	92,1	94,1	0,487	94,4	95,9	0,356
29	95,8	87,9	0,543	97,7	87,1	0,427
Mínimo	87,2	59,5	0,298	87,5	66,4	0,294
Máximo	100,0	96,2	0,980	100,0	95,9	1,770
Médio	96,3	86,2	0,544	96,7	85,8	0,595

4.3.2 Experimento 2

No segundo experimento foi utilizada a mesma abordagem adotada no experimento anterior, com o objetivo de comparar a qualidade dos contornos extraídos por ambos os métodos de extração implementados. Entretanto, no caso deste experimento, foram escolhidos seletivamente alguns edifícios isolados na imagem aérea e realizada a extração de seus contornos de telhado através da utilização de ambos os métodos de extração. O objetivo

principal deste experimento foi avaliar o comportamento e o desempenho do método frente à presença de sombras e vegetação no entorno dos edifícios analisados. Conforme descrito na metodologia, o modelo matemático utilizado pelo método de extração no espaço-objeto possui um termo adicional de energia externa (energia de desnível) que visa auxiliar na discriminação de falsos positivos decorrentes principalmente da projeção de sombras.

Também foi avaliada a contribuição da restrição baseada em informações derivadas do TIN e utilizada no processo de amostragem das quinas iniciais para a definição do contorno de telhado. Para avaliar esta restrição de amostragem, foram propositalmente utilizados neste experimento contornos iniciais aproximados bastante distantes nos contornos reais de telhados, conforme ilustra a Figura 32. Entretanto, a utilização proposital destes contornos provoca uma tendência na análise e prejudica diretamente o método de extração no espaço-imagem, que não utiliza um recurso semelhante ao método no espaço-objeto. Desta forma, para remover a influência negativa deste fator sobre o método de extração no espaço-imagem, o espaço de busca tanto para pontos candidatos aos lados do contorno quanto para os pontos de quina foi expandido através do aumento das seções de busca transversais de amostragem de pontos de borda e das janelas de amostragem de pontos de quina, de forma a garantir a inclusão de pontos candidatos pertencentes aos contornos de telhado durante o processo de amostragem. De qualquer maneira, é importante destacar que, em ambos os casos, a extração do contorno de telhado de cada um dos edifícios foi realizada a partir do mesmo contorno inicial, a fim de tornar válida a comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos avaliados.

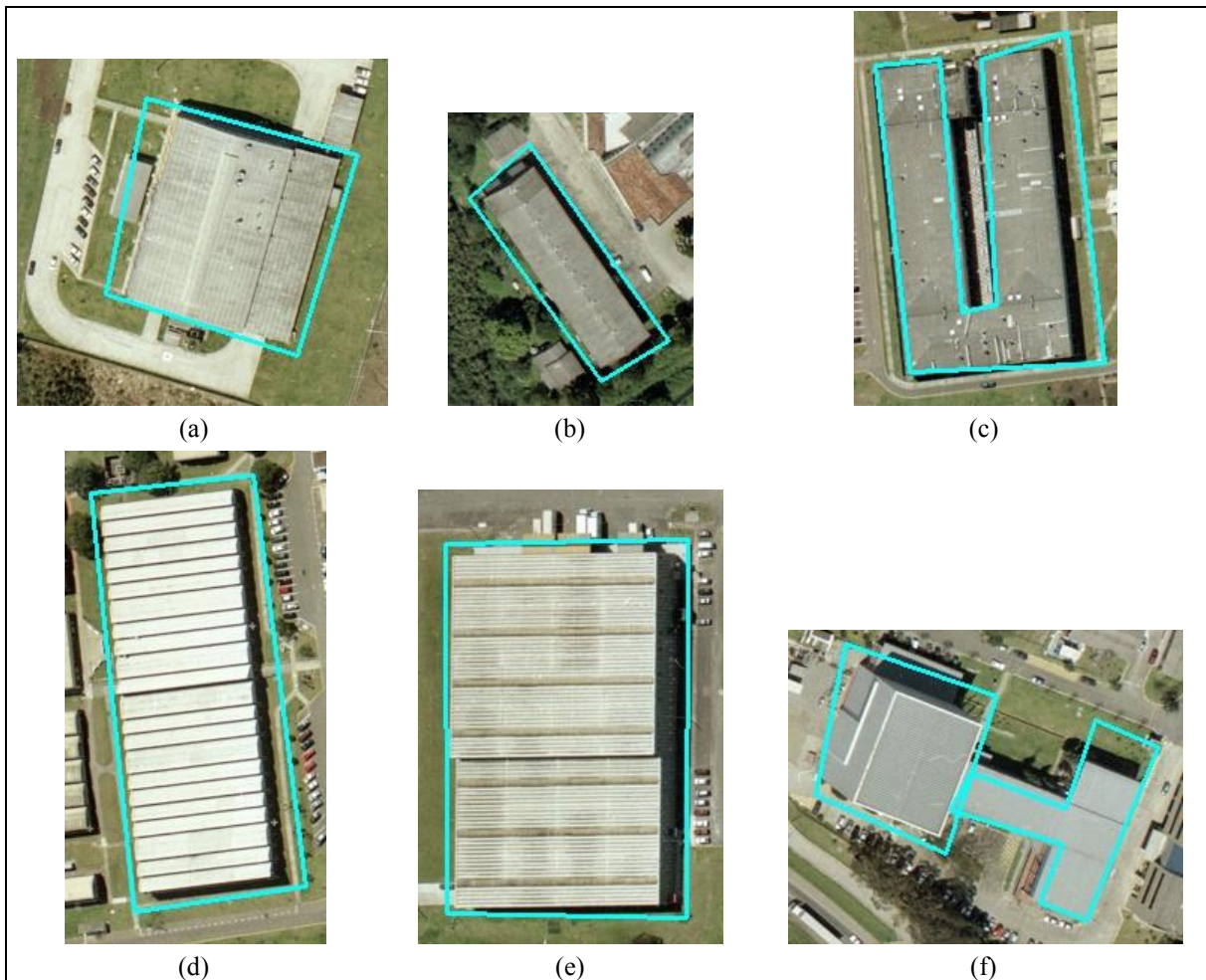


Figura 32 – Contornos utilizados como aproximação inicial para ambos os métodos de extração.

A Figura 33 apresenta os recortes da imagem aérea contendo os contornos de telhado extraídos no espaço-objeto para os edifícios avaliados, enquanto a Figura 34 apresenta os respectivos contornos extraídos no espaço-imagem.

A inspeção visual dos resultados aponta grandes diferenças entre os contornos extraídos por cada um dos métodos, sendo que os contornos extraídos no espaço-objeto apresentam maior acurácia geométrica e maior regularidade em relação aos correspondentes extraídos no espaço-imagem. Estes últimos apresentaram problemas relacionados à convergência para suas posições corretas na imagem aérea. Isto pode ser atribuído principalmente à necessidade de se expandir o espaço de busca de modo a garantir a amostragem de pontos candidatos pertencentes aos contornos de telhado ao se utilizar aproximações muito distantes dos contornos reais. A expansão do espaço de busca teve como consequência a amostragem de pontos de borda e quina pertencentes a objetos vizinhos aos telhados bem como decorrentes da projeção de sombras, o que afetou negativamente o desempenho do método de extração no espaço-imagem. A influência das projeções de

sombras pode ser particularmente analisada neste experimento ao se observarem as imagens de magnitude de bordas correspondentes às regiões dos contornos extraídos neste experimento apresentadas pela Figura 35. As áreas em destaque nesta figura correspondem às regiões da imagem onde ocorrem bordas espúrias resultantes da projeção de sombras dos próprios edifícios avaliados no experimento. A influência negativa das sombras se deve principalmente ao fato de que muitas vezes estas apresentam respostas superiores aos detectores de borda e quina utilizados pelo algoritmo de amostragem em comparação aos próprios limites dos telhados.

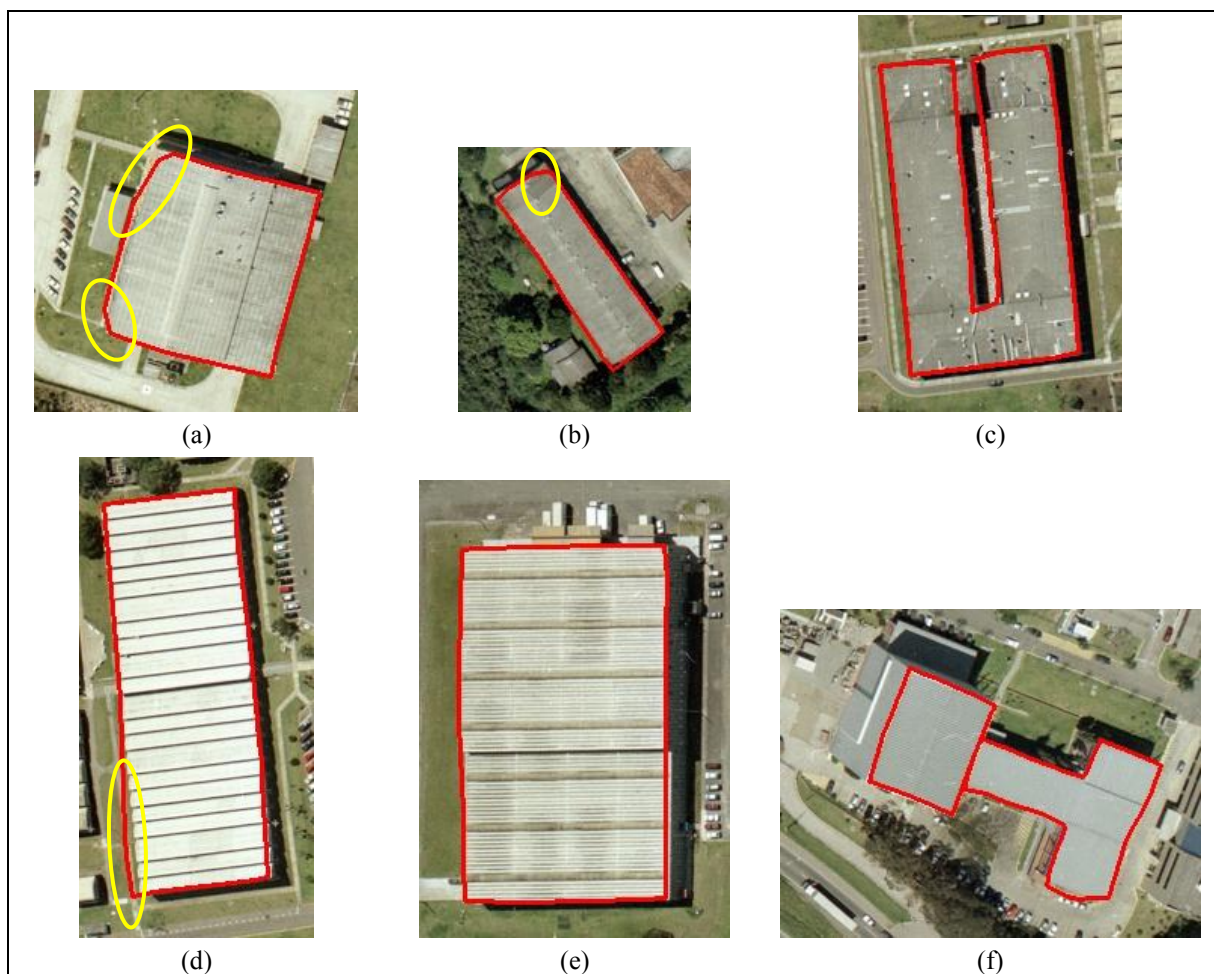


Figura 33 – Contornos de telhado de edifícios extraídos pelo método de extração no espaço-objeto.

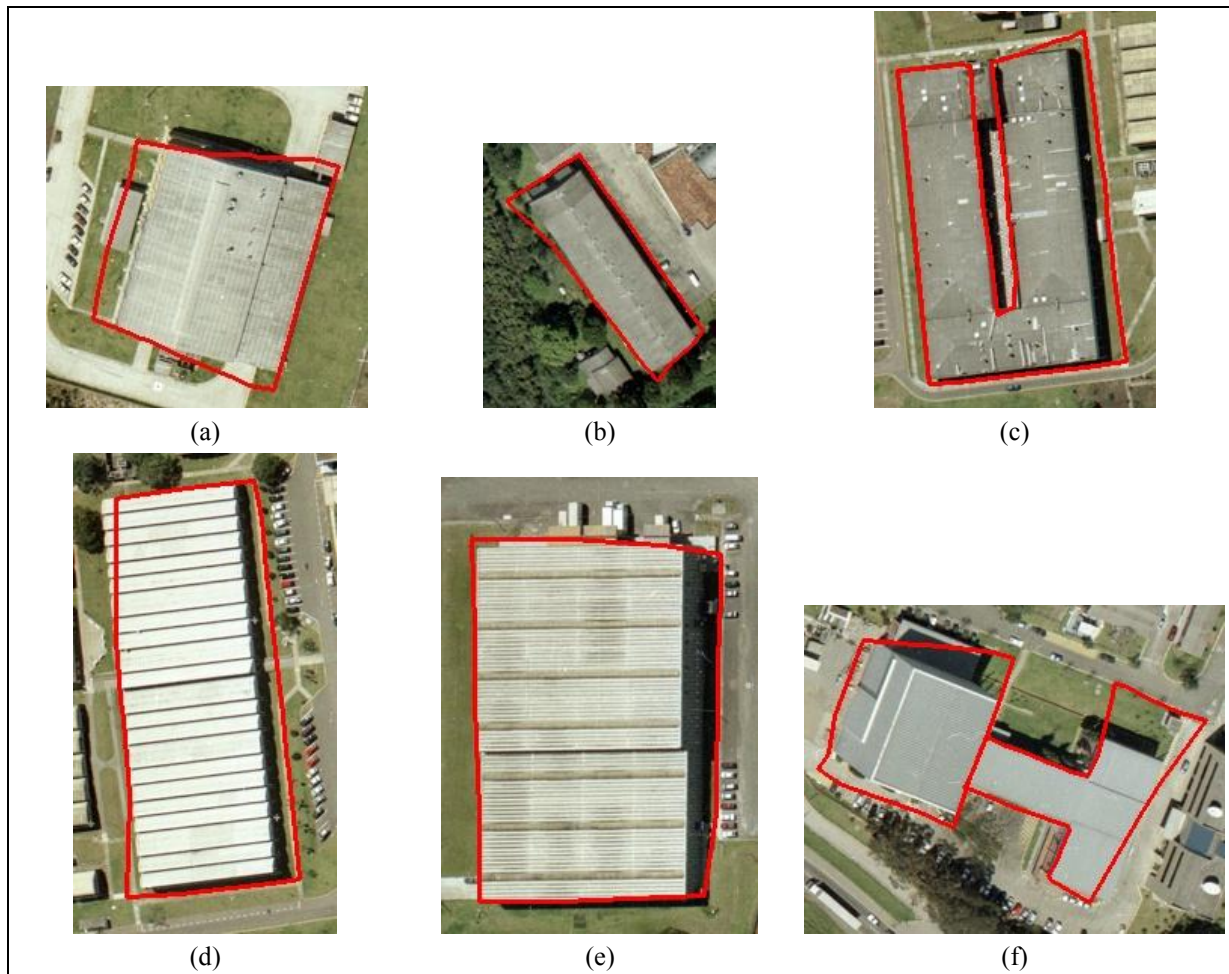


Figura 34 – Contornos de telhado de edifícios extraídos pelo método de extração no espaço-imagem.

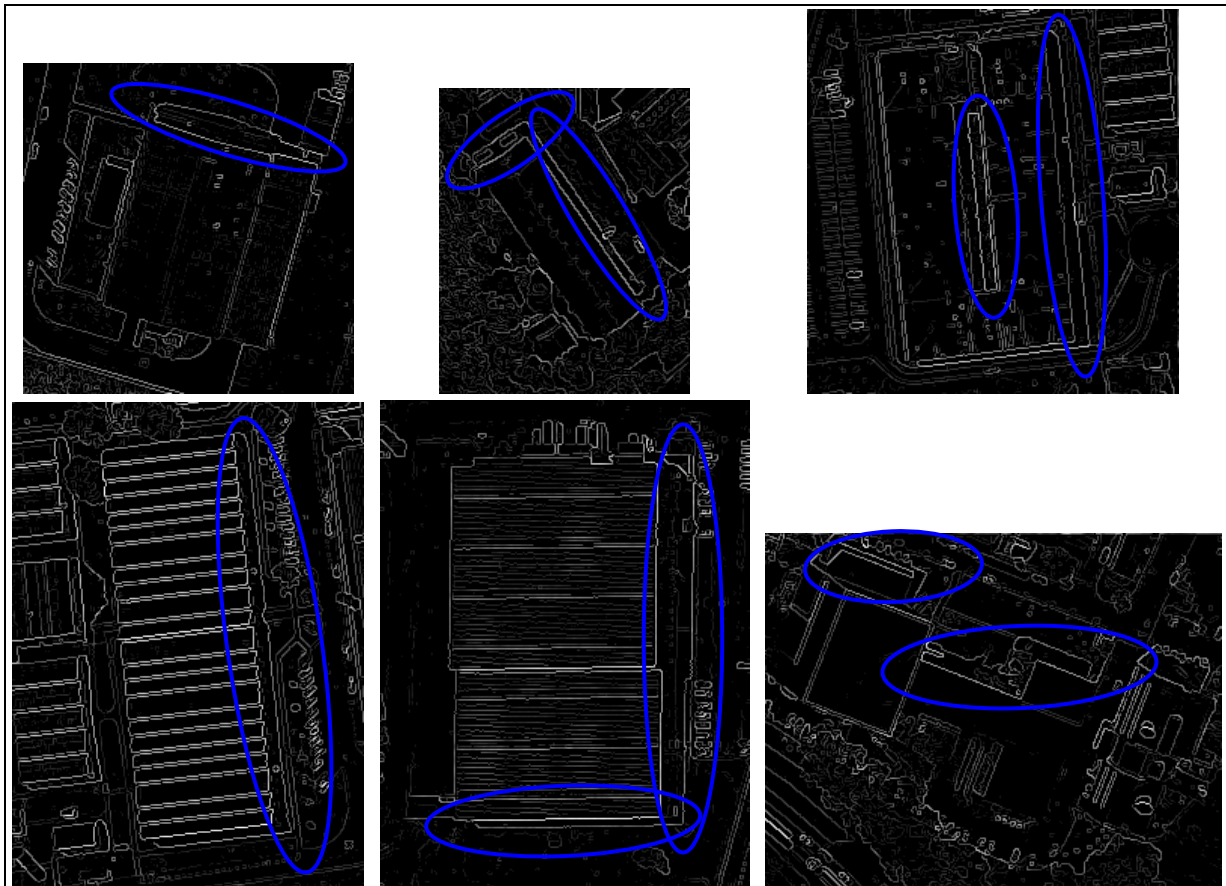


Figura 35 – Imagem de magnitude de bordas correspondentes às regiões dos contornos de telhado extraídos com destaque para áreas correspondentes a bordas causadas pela projeção de sombras.

Embora também seja possível identificar alguns problemas (em destaque na Figura 33) nos resultados obtidos pelo método de extração no espaço-objeto, os contornos extraídos são bem mais acurados em comparação aos respectivos extraídos no espaço-imagem. Para o caso deste experimento, este fato indica que o uso da restrição de amostragem baseada no TIN, bem como do termo adicional de energia externa no modelo matemático utilizado pelo método de extração no espaço-objeto se mostraram úteis na discriminação de falsos positivos correspondentes a contornos causados pela projeção de sombras e também pontos de borda e quina pertencentes a estruturas externas aos telhados. Com base nestes resultados, é possível afirmar que a combinação dos dados de varredura a LASER e imagem aérea realmente beneficia o processo de extração em alguns casos, ajudando a melhorar o desempenho do método e a qualidade dos contornos de telhado extraídos. Isto é um indicativo da superioridade do método de extração no espaço-objeto em relação ao método do espaço-imagem para a extração de contornos de telhado de edifícios para os quais não existe forte interação com objetos adjacentes como vegetação e outros edifícios.

A Figura 36 apresenta as sobreposições dos contornos de telhado de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos neste experimento. Os parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos contornos extraídos pelos dois métodos são apresentados na Tabela 3.

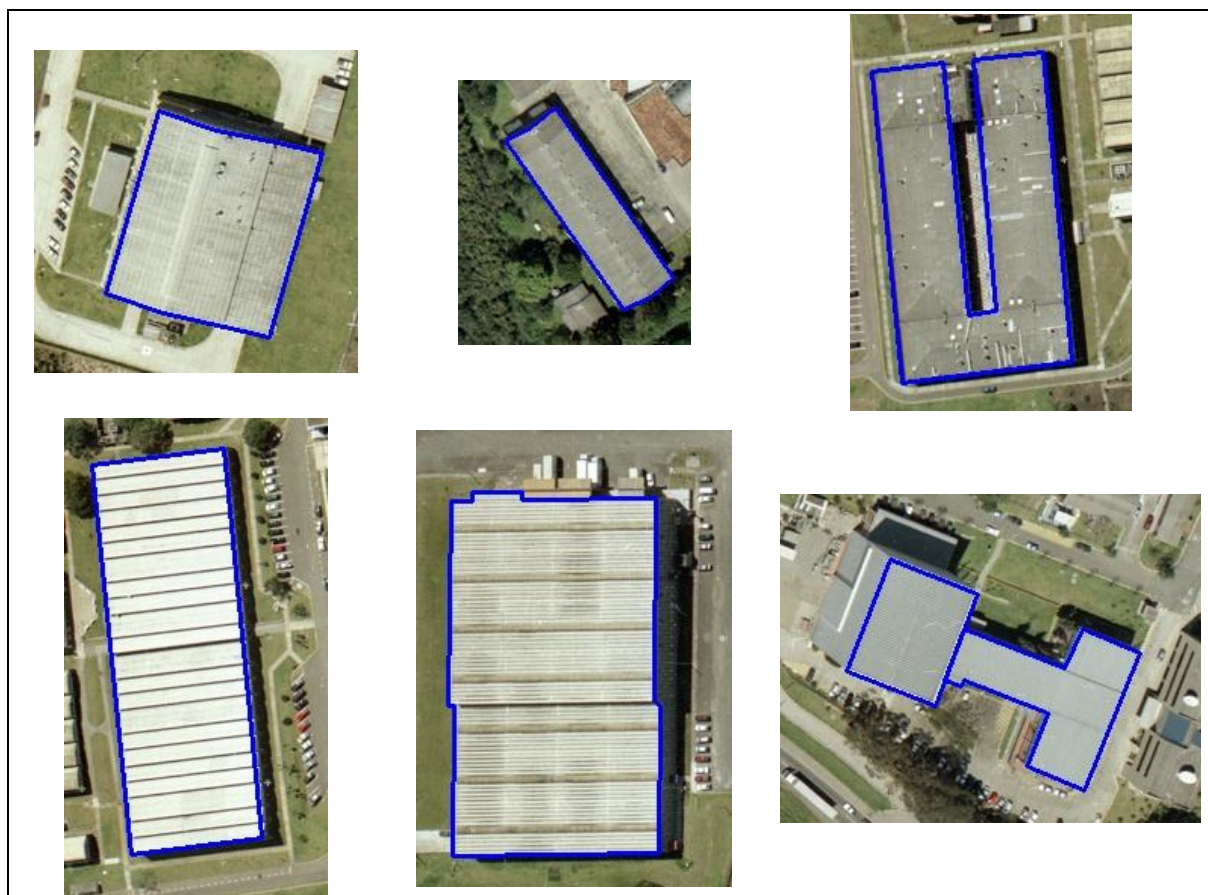


Figura 36 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 2.

Tabela 3 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 2.

Contorno	Espaço-imagem			Espaço-objeto		
	C ₁ (%)	C ₂ (%)	RMSE (m)	C ₁ (%)	C ₂ (%)	RMSE (m)
1	99,2	77,3	3,733	98,7	95,9	1,702
2	99,5	74,5	3,048	98,2	96,7	0,623
3	97,8	79,9	5,115	99,1	96,3	0,900
4	97,5	80,6	3,057	96,4	97	0,738
5	99,3	85,4	5,786	97,8	99,5	1,367
6	93,3	69,2	1,932	98,2	93,5	0,732
7	96,7	45,3	5,328	93,3	96,3	0,845
Mínimo	93,3	45,3	1,932	93,3	93,5	0,623
Maximo	99,5	85,4	5,786	99,1	99,5	1,702
Médio	97,6	73,2	4,000	97,4	96,5	0,987

A análise dos parâmetros de qualidade obtidos neste experimento indica melhoria significativa dos contornos extraídos no espaço-objeto em relação aos correspondentes extraídos no espaço-imagem, confirmando as impressões resultantes da análise visual dos resultados. A comparação dos resultados indica melhora em todos os indicadores de qualidade, confirmando a superioridade do método de extração no espaço-objeto neste experimento.

4.3.3 *Experimento 3*

Embora os resultados obtidos no experimento 1 mostrem a equivalência entre os métodos no espaço-imagem e no espaço-objeto em áreas onde existe forte interação entre os objetos presentes na cena, os resultados obtidos no experimento 2 mostraram alguma superioridade do método de extração no espaço-objeto, principalmente no descarte de falsos positivos causados por contornos de sombra adjacente aos edifícios. Conforme previsto na Seção 4.2.4, a partir do experimento 3 em diante a avaliação experimental é focada na análise do método de extração no espaço-objeto, que é o alvo central de investigação deste trabalho.

A área de teste selecionada para a realização do terceiro experimento corresponde ao Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná que, em sua maioria, apresenta edifícios regulares descritos por formas retilíneas e telhados planos ou com pouca inclinação. Nesta área existe pouca interação entre alguns edifícios e objetos de vegetação, sendo que a maioria dos edifícios encontra-se isolada dos demais, exceto para alguns em que existem conexões secundárias ligando vários edifícios. Para estes casos, a extração dos contornos foi realizada para cada edifício individualmente. A densidade média de pontos de elevação na área escolhida para a realização deste experimento é similar a do experimento 1 (aproximadamente 3 a 4 pontos/m²). A Figura 37 apresenta a área de teste, com os contornos de telhado extraídos no espaço-objeto para a maioria dos edifícios presentes sobrepostos à imagem aérea de entrada.

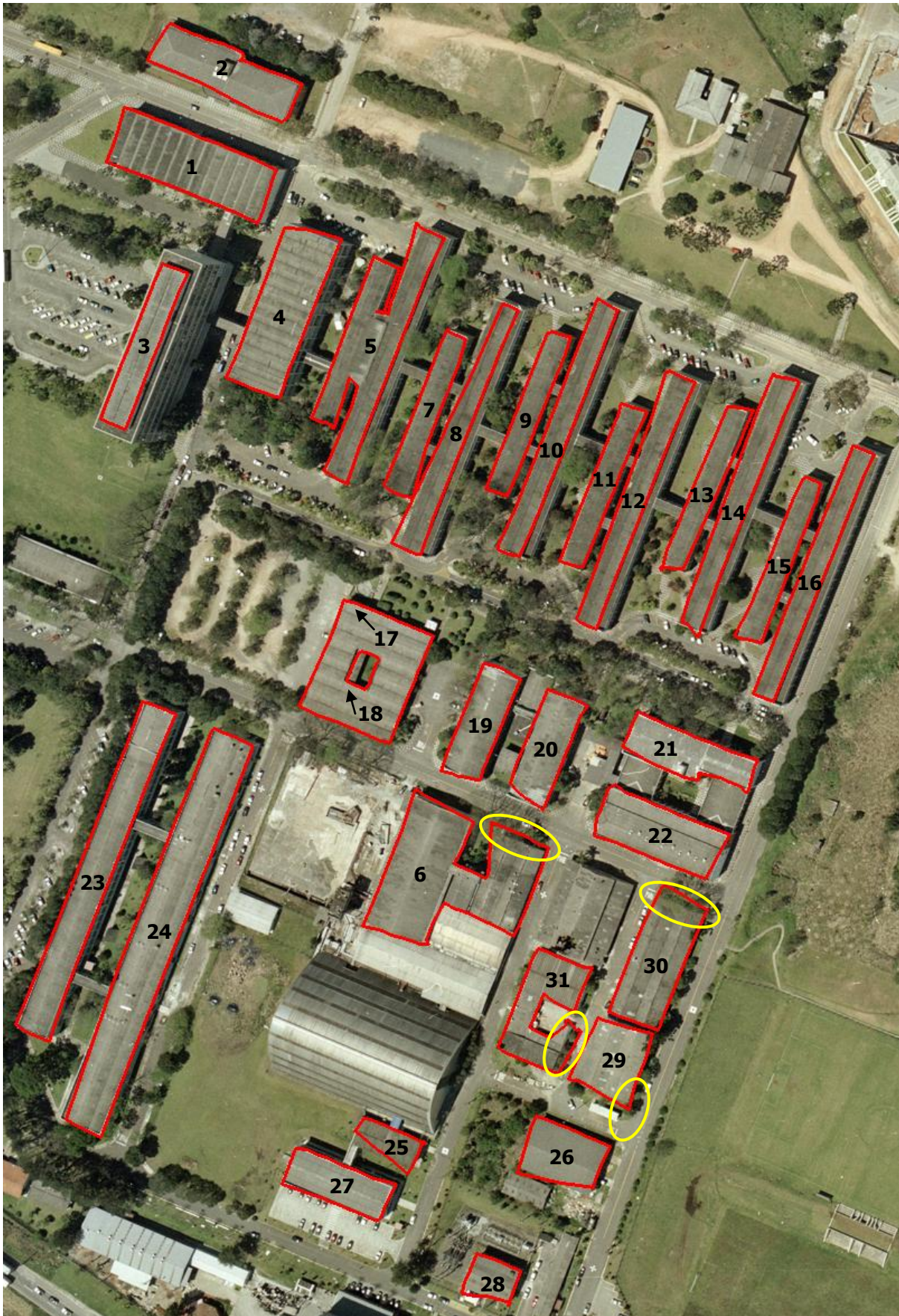


Figura 37 – Contornos de telhado de edifícios extraídos no experimento 3.

A inspeção visual dos resultados mostra que a extração dos contornos de telhado foi bem sucedida na maioria dos casos, uma vez que se observa boa correspondência entre os contornos extraídos e os reais presentes na imagem aérea. Este fato pode ser atribuído principalmente à boa definição das bordas da maioria dos edifícios nas regiões dos telhados e ao bom desempenho obtido na segmentação destes objetos a partir do TIN. Entretanto, alguns problemas podem ser identificados nos resultados, causados pela interação dos edifícios com objetos vizinhos (principalmente vegetação adjacente aos edifícios), o que interfere na definição das bordas e na acurácia obtida na segmentação de seus telhados a partir do TIN. As regiões que sofreram influência negativa destes fatores são apresentadas em destaque na Figura 37. Parte dos problemas enfrentados pelo método também está relacionada à densidade de pontos laser na área de teste: em muitos casos é difícil, e por vezes, impossível, produzir uma modelagem para representar com acurácia suficiente os planos de telhado. A consequência deste fato é que a amostragem de pontos candidatos aos lados e quinas de um contorno produz pontos com baixa acurácia, o que se reflete nos resultados obtidos pelo método de extração no espaço-objeto.

A Figura 38 apresenta as sobreposições na imagem aérea dos contornos de telhado utilizados como referência para a comparação numérica dos contornos de telhado extraídos neste experimento. Os parâmetros de qualidade estimados na análise numérica são apresentados na Tabela 4.



Figura 38 – Contornos de referência utilizados na avaliação numérica dos resultados obtidos no experimento 3.

Tabela 4 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 3.

Contorno	C ₁ (%)	C ₂ (%)	RMSE (m)
1	96,4	96,1	0,905
2	91,7	97,5	0,451
3	98,3	95,2	0,379
4	99,1	97,2	0,535
5	86,8	98,4	1,430
6	97,0	89,2	1,002
7	98,1	84,1	0,714
8	64,7	92,0	2,510
9	99,0	90,1	0,575
10	69,9	90,2	2,537
11	97,9	91,1	0,579
12	70,6	88,9	2,742
13	97,4	89,4	0,906
14	71,7	90,5	2,446
15	97,3	95,4	0,564
16	72,2	96,5	2,195
17	99,6	97,8	0,501
18	72,9	100,0	1,194
19	98,6	95,1	0,484
20	95,1	91,9	1,002
21	95,1	94,0	0,553
22	97,1	94,1	0,794
23	100,0	90,8	0,518
24	97,7	96,4	0,579
25	83,0	89,9	1,022
26	95,4	94,0	0,906
27	99,3	93,4	0,618
28	96,8	91,4	0,816
29	97,2	85,7	1,266
30	95,9	91,8	1,441
31	95,1	87,7	0,854
Mínimo	64,7	84,1	0,379
Máximo	100,0	100,0	2,742
Médio	91,2	92,8	1,065

A análise dos valores obtidos mostra que a completeza foi superior a 90% para 23 contornos e a correção para 24 dos 31 contornos extraídos. Considerando os dois indicadores conjuntamente, 18 contornos apresentam valores superiores a 90%. Em relação ao RMSE, apenas 3 dos 31 contornos extraídos apresentaram valor inferior a 0,5 m (2 pixels na imagem aérea). Alguns apresentaram, inclusive, valores superiores a 2 m, indicando menor acurácia alcançada no processo de extração. Estes contornos também apresentaram valores mais baixos de completeza, confirmando o menor desempenho alcançado pelo método de

extração nestes casos. Em relação ao desempenho geral alcançado pelo método, o valor médio de correção acima de 90% indica desempenho superior ao observado no experimento 1 e compatível com o observado no experimento 2 (para o caso do método no espaço-objeto).

4.3.4 Experimento 4

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no quarto experimento descrito na avaliação do método desenvolvido. Para a realização dos testes, novamente foi selecionada uma região da imagem aérea correspondente a uma quadra urbana de uma área residencial e utilizado o método de extração no espaço-objeto para obter os contornos de telhado dos edifícios presentes na referida região. As características da área selecionada permitem avaliar a resposta do método frente às interações existentes entre os edifícios e outros objetos (principalmente áreas sombreadas e de vegetação) presentes na área. A densidade média de pontos de elevação nesta área teste é de aproximadamente 3 a 4 pontos/m² (similar aos experimentos 1 e 3). A Figura 39 apresenta o recorte da imagem aérea contendo os contornos de telhado extraídos sobrepostos na imagem aérea de entrada.



Figura 39 – Contornos de telhado de edifícios extraídos no experimento 4.

A inspeção visual dos resultados obtidos indica que a extração dos contornos de telhado foi bem sucedida para a maioria dos edifícios presentes na área

selecionada. Entretanto, existem alguns edifícios para os quais a extração do contorno de telhado não foi bem sucedida. Nestes casos a falha pode ser atribuída em parte à estratégia utilizada na separação dos telhados a partir do TIN, o que inviabiliza a extração de seus respectivos contornos. Parte dos problemas encontrados neste experimento se deve também à baixa densidade de pontos laser na área de teste. Esta densidade é insuficiente para modelar adequadamente (com boa acurácia) os planos que representam as faces do telhado e, conseqüentemente, os pontos amostrados ao longo dos planos de telhados e nas adjacências destes não possuem acurácia adequada para descrever os contornos de telhado, o que se reflete nos resultados obtidos pelo método de extração no espaço-objeto.

Também é possível notar a ocorrência de falsos positivos (pontos de borda e quina nas regiões em destaque na Figura 39) decorrentes da forte interação existente entre os próprios edifícios e objetos correspondentes à sombra e vegetação adjacentes a eles. Além disso, a análise visual revela certa dificuldade do método em extrair detalhes mais finos dos contornos principalmente no caso dos edifícios menores. A combinação destes fatores influenciou negativamente na acurácia geométrica dos contornos extraídos.

A Figura 40 apresenta os contornos de referência utilizados na avaliação numérica dos resultados obtidos neste experimento. Os parâmetros de qualidade estimados para os contornos de telhado extraídos são apresentados na Tabela 5.



Figura 40 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 4.

Tabela 5 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 4.

Contorno	C ₁ (%)	C ₂ (%)	RMSE (m)
1	96,3	79,2	1,675
2	97,7	86,6	0,556
3	99,5	89,0	0,412
4	97,8	89,5	0,736
5	98,9	73,8	0,531
6	97,6	85,9	0,433
7	87,1	89,5	1,880
8	98,5	83,3	0,500
9	94,5	82,0	0,880
10	96,5	77,3	0,473
11	92,1	92,9	0,527
12	100,0	88,3	0,417
13	93,9	85,2	0,747
14	97,5	74,4	0,871
15	99,1	78,5	0,589
16	98,5	92,0	0,551
17	99,1	94,8	0,260
18	98,3	92,1	0,419
19	99,9	88,2	0,316
20	98,6	83,7	0,587
21	99,1	93,5	0,442
22	99,6	82,1	0,287
23	92,0	81,1	0,603
Mínimo	87,1	73,8	0,260
Máximo	100,0	94,8	1,880
Médio	97,1	85,4	0,639

A análise indica altos valores de completeza (acima de 90% para 22 dos 23 contornos extraídos com sucesso). Entretanto, apenas cinco destes contornos apresentam correção superior a 90%. Em comparação ao experimento anterior, houve piora na qualidade dos resultados e, em termos numéricos, existe maior similaridade com o primeiro experimento, mostrando que o método no espaço-objeto, embora apresente vantagens em alguns casos (como relatado no experimento 2), é sensível às interações existentes entre os objetos presentes na área de teste.

No caso deste experimento também foi possível verificar que o uso da restrição de amostragem baseada no TIN e do termo adicional de energia externa no modelo matemático do método de extração no espaço-objeto não auxiliou efetivamente na discriminação e eliminação de falsos positivos, como é possível observar principalmente através da inspeção visual dos resultados obtidos.

4.3.5 Experimento 5

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no quinto experimento descrito na avaliação do método desenvolvido. Na execução deste experimento, foi utilizada a mesma abordagem adotada no experimento anterior, ou seja, o método de extração no espaço-objeto foi utilizado para extrair os contornos de telhado dos edifícios presentes em uma região da imagem aérea correspondente a uma quadra urbana localizada em uma área de uso predominantemente residencial. A região selecionada para o teste apresenta características similares às da área avaliada no experimento anterior: embora a densidade de edifícios seja menor, alguns deles apresentam forte interação com seus vizinhos principalmente devido à proximidade de seus telhados. A densidade média de pontos de elevação na área de teste é similar à dos demais experimentos descritos (3 a 4 pontos/m²). A Figura 41 apresenta os contornos de telhado extraídos neste experimento sobrepostos sobre o recorte da imagem aérea utilizada.



Figura 41 – Contornos extraídos no espaço-objeto no experimento 5.

A inspeção visual dos resultados obtidos mostra que a extração dos contornos de telhado foi novamente bem sucedida para a maioria dos edifícios presentes na

área avaliada. Entretanto, similarmente ao experimento anterior, também ocorreram falsos positivos relativos à extração de pontos de borda e quina pertencentes às estruturas externas aos telhados (regiões em destaque na Figura 41). Também não foram extraídos contornos para a totalidade dos edifícios presentes na área avaliada, em virtude de falhas ocorridas na estratégia utilizada para separar os telhados a partir do TIN. Da mesma maneira é possível verificar deficiências do método ao tratar os detalhes mais finos de alguns dos contornos extraídos. No geral os resultados obtidos são similares aos do experimento anterior, embora a acurácia geométrica percebida através da inspeção visual seja melhor para os contornos extraídos neste experimento.

A Figura 42 ilustra os contornos de telhado de referência (sobrepostos na imagem aérea) utilizados na análise numérica dos resultados obtidos. Os parâmetros de qualidade estimados nesta análise são apresentados pela Tabela 6.



Figura 42 – Contornos de referência utilizados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 5.

Tabela 6 – Parâmetros de qualidade estimados na análise numérica dos resultados obtidos no experimento 5.

Contorno	C ₁ (%)	C ₂ (%)	RMSE (m)
1	99,0	94,6	0,315
2	96,7	95,2	0,809
3	99,7	92,2	0,412
4	99,2	87,2	0,572
5	98,6	83,2	0,671
6	99,0	91,1	0,513
7	96,2	90,0	0,689
8	99,1	93,7	0,438
9	99,5	92,8	0,368
10	99,5	91,6	0,471
11	99,4	68,5	0,985
12	99,3	84,8	0,427
13	100,0	93,6	0,398
14	98,3	95,7	0,389
15	99,4	84,7	0,495
16	91,5	93,9	0,621
17	98,5	85,7	0,575
18	100,0	67,2	0,893
19	98,7	91,2	0,739
Mínimo	91,5	67,2	0,315
Máximo	100,0	95,7	0,985
Médio	98,5	88,3	0,567

A análise dos parâmetros estimados mostra que, de fato, a acurácia obtida é maior em relação à alcançada no experimento anterior. Todos os contornos extraídos apresentam completeza superior a 90%. A correção alcançada é superior a 90% para 11 dos 19 contornos e inferior a 80% em apenas dois casos, que correspondem aos contornos que apresentaram os piores valores de RMSE e, conseqüentemente, menor correspondência com os contornos de referência.

Embora estes fatores não tenham sido efetivamente avaliados neste experimento, o uso da restrição de amostragem baseada no TIN e do termo adicional de energia externa (energia de desnível) no modelo matemático do método de extração parece ter contribuído na discriminação de falsos positivos para alguns dos contornos extraídos. Por outro lado, fica evidente que estes fatores nem sempre ajudam na discriminação de falsos positivos (vide contornos indicados por setas na Figura 41).

De modo geral, os resultados obtidos neste experimento, bem como nos experimentos 1 e 4 apontam algumas deficiências no método desenvolvido em lidar com áreas de maior complexidade onde existe forte interação entre os objetos presentes na cena.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

5.1 Conclusões

Nesta seção são apresentadas as principais conclusões decorrentes da análise dos resultados obtidos na avaliação experimental do método de extração desenvolvido. Ao todo foram descritos e analisados cinco dos experimentos realizados com o objetivo de avaliar o método de extração proposto neste trabalho. Os detalhes referentes à análise dos resultados obtidos nesses experimentos são apresentados no Capítulo 4. Os experimentos 1 e 2 foram apresentados com o objetivo de comparar o desempenho de ambos os métodos desenvolvidos na tarefa de extração dos contornos de edifícios no contexto de uma quadra urbana (experimento 1) ou isoladamente (experimento 2). Os demais experimentos (3 a 5) consideraram apenas a utilização do método de extração no espaço-objeto, a fim de realizar uma análise mais extensiva do método de extração desenvolvido.

Conforme descrito na análise dos experimentos apresentados, existem três fatores principais que afetam a qualidade dos resultados produzidos pelo método de extração desenvolvido. Tais fatores se referem à:

- 1) Definição das bordas dos edifícios na imagem;
- 2) Definição dos vértices de quina dos edifícios na imagem;
- 3) Interação com objetos vizinhos ao telhado sendo extraído.

O primeiro deles refere-se à qualidade de definição de bordas e quinas na imagem aérea. De fato, modelos matemáticos para a extração de feições baseados em *snakes* tradicionais são sensíveis à qualidade da imagem de entrada utilizada, uma vez que a energia externa, responsável por mover a curva em direção às feições de interesse, é obtida a partir dos dados de imagem. Mesmo no caso do método apresentado neste trabalho, em que a extração dos contornos de telhado é realizada no espaço-objeto, é a parcela do termo de energia externa obtida a partir da imagem aérea o principal fator responsável por definir com qualidade a posição dos vértices que descrevem o contorno de um telhado. A parcela da energia externa correspondente ao termo de energia de desnível auxilia apenas na penalização de falsos positivos de borda e quina. Desta forma, a presença de ruídos e bordas espúrias (causadas, por exemplo, pela projeção de sombras) pode interferir negativamente no desempenho de método de extração desenvolvido.

A definição das quinas também afeta diretamente a qualidade dos resultados produzidos pelo método desenvolvido. Isto acontece porque a resposta ao operador de Harris é um dos termos de energia externa do modelo matemático de contornos de telhado, e pontos amostrados em regiões de quinas que apresentam maiores respostas ao operador de Harris têm maior probabilidade de serem selecionados pelo algoritmo de PD como pertencentes a um contorno de telhado.

A influência negativa devida à presença de ruídos pode ser minimizada pela aplicação de operações de pré-processamento na imagem aérea de entrada. Um exemplo é a filtragem passa-baixas baseada na mediana, que apresenta a vantagem de atenuar os ruídos presentes na imagem e preservar as bordas dos objetos. Vale ressaltar que esta etapa de pré-processamento foi utilizada neste trabalho para minimizar a ocorrência de ruídos nas imagens aéreas utilizadas na avaliação experimental com o objeto de minimizar a influência deste fator no desempenho do método de extração.

A interação com objetos vizinhos a um telhado também influencia no desempenho do método de extração. Isto ocorre porque na amostragem de vértices candidatos à representação do contorno podem ser amostrados pontos de borda e quina pertencentes a estes objetos. Conseqüentemente, estes pontos farão parte do espaço de busca do algoritmo de PD e podem ser selecionados como pertencentes a um contorno de telhado se os mesmos contribuírem para a definição de um valor mínimo global de energia para o modelo matemático que representa o contorno de um telhado. Para minimizar a influência deste efeito sobre os resultados, o método de extração desenvolvido utiliza uma restrição de amostragem baseada no TIN e um termo adicional de energia externa no modelo matemático representativo dos contornos de telhado no espaço-objeto para penalizar a energia de vértices amostrados em regiões externas ao telhado de um edifício. Exemplos bem sucedidos do uso destas restrições são apresentados nos resultados descritos no experimento 2. Estas restrições também foram utilizadas nos demais experimentos apresentados, de modo a garantir um melhor desempenho do método de extração desenvolvido. Entretanto, seu uso bem sucedido também depende da acurácia obtida pela estratégia de separação dos telhados a partir do TIN. Desta estratégia depende o próprio método de extração, uma vez que falhas na segmentação dos telhados inviabilizam a utilização do método de extração no espaço-objeto. Este fato ocorreu para alguns edifícios em todos os experimentos envolvendo a extração de uma quadra urbana completa. Os fatores que influenciam o desempenho da estratégia utilizada na separação dos telhados e, conseqüentemente, nos resultados produzidos pelo método de extração, estão diretamente ligados à interação dos telhados com objetos vizinhos a eles,

como árvores e outros telhados, além da complexidade do próprio telhado. Isto pode ser notado principalmente através dos resultados obtidos no experimento 4. A proximidade (e até mesmo conexões) entre os telhados influenciaram negativamente na estratégia de separação e nos contornos extraídos. Para o caso do experimento 5 este fator não se mostrou tão relevante, uma vez que os telhados da área avaliada apresentam menor grau de interação com seus objetos vizinhos. Conseqüentemente, a estratégia de separação foi capaz de segmentar corretamente a maioria dos telhados, o que aliado às restrições derivadas do TIN, possibilitou a obtenção de melhores resultados.

Em relação à utilização do algoritmo de PD na solução do modelo matemático representativo dos contornos de telhado de edifícios, foi possível a identificação de vantagens e desvantagens. A principal vantagem refere-se ao maior raio de convergência alcançado por este algoritmo em relação à solução tradicional de *snakes* baseada em cálculo variacional (GRUEN e LI, 1995). Esta última é muito sensível à aproximação inicial e pode frequentemente convergir para mínimos locais (KASS *et al.*, 1988). Já o uso de PD possibilita a definição de um espaço de busca suficientemente amplo para possibilitar a localização do objeto de interesse. Outra vantagem do uso de PD foi a possibilidade de se impor restrições no modelo matemático de contornos de telhado dentro do próprio algoritmo de solução, de modo a favorecer edifícios caracterizados por estruturas retilíneas na imagem (definidos por segmentos retos que se interceptam em quinas).

A principal desvantagem é justamente relacionada à amplitude do espaço de busca do algoritmo de PD: quanto maior esta amplitude, maior é a probabilidade de ocorrerem interações entre o objeto sendo extraído e objetos no contexto de sua vizinhança, o que pode influenciar negativamente no desempenho do método de extração. Isto é particularmente crítico na extração de edifícios em ambientes urbanos, onde os edifícios frequentemente interagem com elementos de vegetação e principalmente com outros edifícios presentes no contexto de sua vizinhança.

Por fim, vale destacar que o método apresentado reflete bem a sinergia existente entre os dados de varredura a LASER e fotogramétricos no contexto de extração de contornos de telhado de edifícios. Pode-se dizer que, na busca do contorno de telhado ótimo, os polígonos candidatos deslizam sobre o telhado (representado por faces do TIN) e extensões deste, sob o controle da energia externa da imagem (composta de termos de energia derivados de pontos de borda e quina) e, também, da energia externa de desnível obtida a partir do TIN.

5.2 *Recomendações para trabalhos futuros*

Esta seção apresenta algumas recomendações para trabalhos a serem futuramente realizados no intuito de aperfeiçoar o método de extração desenvolvido. A primeira delas é a remoção da dependência existente no método atual referente ao fornecimento de um ponto semente aproximado para cada quina do contorno de telhado do edifício a ser extraído. Esta dependência pode ser removida, por exemplo, através da extração aproximada de alguns pontos sementes e utilização posterior de algoritmos de divisão recursiva de linhas (DOUGLAS e PEUCKER, 1973). Outra sugestão é a utilização de contornos iniciais aproximados, obtidos automaticamente a partir do processamento do TIN, o que tornaria o método independente da intervenção do operador humano na identificação e seleção do contorno inicial aproximado requerido pelo modelo de contornos de telhado de edifícios baseado em *snakes*. Outra recomendação é a utilização futura de algoritmos de pós-processamento para a regularização geométrica, a fim de remover eventuais irregularidades e melhorar a qualidade geométrica dos contornos extraídos. Recomenda-se também avaliar se etapas de pré-processamento como a detecção e a rotulação de regiões da imagem aérea afetadas por sombreamento, utilizadas em conjunto com informações de efemérides solares, podem auxiliar no aumento de robustez do método desenvolvido.

Por fim, o método proposto pode ser estendido para tratar casos de contornos de telhado de edifícios representados por formas não retilíneas, com o objetivo de torná-lo um método genérico para a extração deste tipo de feição a partir de imagens aéreas digitais de alta resolução.

REFERÊNCIAS

AGOURIS, P. *et al.* Dynamic node distribution in adaptive *snakes* for road extraction. **14th Annual Vision Interface Conference**. Proceedings, p. 134-140, Ottawa, 2001.

AHMADI, S. *et al.* Automatic urban building boundary extraction from high resolution aerial images using an innovative model of active contours. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, p. 150-157, 2010.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998, 258 p.

BALLARD, D.; BROWN, C. M. **Computer vision**. New Jersey: Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1982, 523 p.

BIOSCA, J. M.; LERMA, J. L. Unsupervised robust planar segmentation of terrestrial laser scanner point clouds based on fuzzy clustering methods. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 63, p. 84-98, 2008.

BLACHUT, T.; CHRZANOWSKI, A.; SAASTAMOINEN, J. **Urban surveying and mapping**. New York: Springer-Verlag, 1979, 372 p.

CHENG, J.; FOO, S. W. Dynamic directional gradient vector flow for *snakes*. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 15, n. 6, p. 1563-1571, 2006.

DAL POZ, A. P. Extração automática de edifícios: comparação de paradigmas e exemplos. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Anais, 2009, p. 5015-5022.

DAL POZ, A. P. Metodologias semi-automáticas para extração de rodovias em imagens digitais usando programação dinâmica, análise de bordas de rodovia e teste ativo. Tese de Livre-Docência. Depto. de Cartografia – FCT/UNESP. Presidente Prudente, 2003, 159 p.

DAL POZ, A. P. Um modelo fotogramétrico inverso: Aplicações na Cartografia. **Revista Brasileira de Engenharia e Ciências Aplicadas**, São Paulo, v. 4, p. 98-116, 1998.

DAL POZ, A. P.; GALLIS, R. B. A.; SILVA, J. F. C. Three-dimensional semiautomatic road extraction from a high-resolution aerial image by dynamic-programming optimization in the object space. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 7, n. 4, p. 796-800, 2010.

DAL POZ, A. P.; VALE, G. M. Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium- and high-resolution images. **ISPRS Archives**, v. 34, n. 3/W8, p. 87-91, Munich, 2003.

DOUGLAS, D.; PEUCKER, T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. **The Canadian Cartographer**, v. 10, n. 2, p. 112-122, 1973.

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. 267 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

GRUEN, A.; LI, H. Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 50, n. 4, p. 11-20, 1995.

GUERCKE, R.; GÖTZELMANN, T; BRENNER, C.; SESTER, M. Aggregation of LoD 1 building models as an optimization problem. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 2, p. 209-222, 2011.

GUO, T.; YASUOKA, Y. *Snake*-based approach for building extraction from high-resolution satellite images and height data in urban areas. 2003. Accessed 30/06/10. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/vhr/018.pdf>.

HAALA, N.; BRENNER, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 130-137, 1999.

HARRIS, C.; STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. **Alvey Vision Conferece**, University of Manchester, Proceedings, p. 147-151, 1988.

HEIPKE, C. et al.. Evaluation of automatic road extraction. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 323-4W2, p. 151-160, 1997.

KASS, M.; WITKIN, A.; TERZOPOULOUS, D. *Snakes*: Active contour models. **International Journal of Computer Vision**, v. 1, n. 4, p. 321-331, 1988.

KRAUS, K. **Photogrammetry: fundamentals and standard processes**. Bonn: Dümmler, 1993, 397 p.

LAFARGE, F. *et al.* An Automatic Building Reconstruction Method: A Structural Approach using High Resolution Satellite Images. **IEEE International Conference on Image Processing 2006**, Proceedings, p. 1205-1208, 2006.

LEE, D. S.; SHAN, J.; BETTEL, J. S. Class-Guided Building Extraction from IKONOS Imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, n. 2, p. 143-150, 2003.

LI, H. Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images. PhD Thesis, Report n°. 61, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich, Switzerland, 161p. 1997.

LIU, Z. J. *et al.* Building extraction from high resolution imagery based on multi-scale object oriented classification and probabilistic Hough transform. **Geoscience and Remote Sensing Symposium 2005**. Proceedings, v. 4, p. 2250-2253, 2005.

LIU, Z. J. *et al.* Building extraction from high resolution satellite imagery based on multi-scale image segmentation and model matching. **International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, 2008**. Proceedings, p. 1-7, 2008.

MIKHAIL, E. M.; ACKERMAN, F. **Observations and least squares**. University Press of America, 1983. 497 p.

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

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo G.N.S.S.:** descrição, fundamentos e aplicações. Editora UNESP, 2008, 480p.

ORIoT, H. Statistical *snakes* for building extraction from stereoscopic aerial images. **ISPRS Archives**, v. XXXIV, Part 3/W8, Munich, 17.-19. Sept. 2003, p. 65-70.

PAPARODITIS, N.; POLIDORI, L. Overview of Surface Digital Models. In: KASSER, M.; EGELS, Y. **Digital Photogrammetry**. 1ª ed. Londres: Taylor & Francis, 2002. v. 1, cap. 3. p. 159-299.

PENG, J.; ZHANG, D.; LIU, Y. An improved *snakes* model for building detection from urban aerial images. **Pattern Recognition Letters**, v. 26, p. 587-595, 2005.

POULLIS, C.; YOU, S. Delineation and geometric modeling of road networks. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, p. 165-181, 2010.

RICHARDUS, P.; ADLER, R. K. **Map projections for geodesists, cartographers, and geographers**. North-Holland Publish Co. 1972, 174 p.

RÜTHER, H.; MARTINE, H. M.; MTALO, E. G. Application of *snakes* and dynamic programming optimisation technique in modeling of buildings in informal settlement areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 56, p. 269-282, 2002.

RUTZINGER, M.; HÖFLE, B.; GEIST, T.; STÖTTER, J. Object-based building detection based on airborne laser scanning with GRASS GIS environment. UDMS 2006: **Urban Data Management Symposium**, Aalborg, Dinamarca, 2006, CD-ROM.

SAMPATH, A.; SHAN, J. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial LiDAR point clouds. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 3, p. 1554-1567, 2011.

SOHN, G. Extraction of buildings from high-resolution satellite data and LIDAR. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2004, v. 35.

SOHN, G.; DOWMAN, I. J. **Extraction of buildings from high-resolution satellite data.** Automatic Extraction of Man Made Objects from Aerial and Space Images. 2001.

SOHN, H.-G. *et al.* 3-D building extraction using IKONOS multispectral images. **Geoscience and Remote Sensing Symposium 2005.** Proceedings, v. 2, p. 1432-1434, 2005.

TANG, J.; MILLINGTON, S.; ACTION, S. T.; CRANDALL, J.; HURWITZ, S. **Ankle cartilage surface segmentation using directional gradient vector flow snake.** Proceedings of International Conference in Image Processing, 2004, p. 2745-2748.

TORGE, W. **Geodesy.** Walter de Gruyter, 2001, 400 p.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 68-82, Jul. 1999.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry:** with applications in GIS. Boston: McGraw-Hill, 2000, 608 p.

XIONG, Z.; ZHANG, Y. Automatic 3D Building Extraction from Stereo IKONOS Images. **Geoscience and Remote Sensing Symposium 2006.** Proceedings, p. 3283-3286, 2006.

XU, C.; PHAN, D. L.; PRINCE, J. L. **Image segmentation using deformable models.** Handbook of Medical Imaging, Bellingham, WA: SPIE, 2000, v. 2. cap. 3, p. 129-174.

XU, C.; PRINCE, J. L. Generalized gradient vector flow external forces for active contours. **Signal Processing**, v. 71, p. 131-139, 1998.

XU, C.; PRINCE, J. L. *Snakes*, shapes, and gradient vector flow. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 7, n. 3, p. 359-369, 1998.

YANG, Q.; SNYDER, J. P.; TOBLER, W. R. **Map projection transformations:** principles and applications. Hong Kong: Taylor and Francis, 2000, 367 p.