

# RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE EDIFICAÇÕES UTILIZANDO DADOS LASER SCANNER AEROTRANSPORTADOS

*3D reconstruction of building using Laser Scanner data airborne*

MOSAR FARIA BOTELHO<sup>1</sup>

JORGE ANTONIO SILVA CENTENO<sup>1</sup>

Programa de pós graduação em Ciências Geodésicas

Universidade Federal do Paraná – Brasil

(mosar, centeno)@ufpr.br

## RESUMO

Uma edificação pode ser reconstruída a partir de seu telhado, o qual pode ser definida por parâmetros como orientação, altura, bordas do contorno e da cumeeira. O propósito do presente trabalho é apresentar um método para reconstrução automática de modelos de edificação 3D em áreas construídas utilizando dados provenientes do *Laser scanner* aerotransportado. Para tanto, determina-se as extremidades do telhado, encontra-se os planos e pontos do Laser que compõem cada face do telhado, realiza-se a interseção dos planos gerados para localizar a cumeeira e, finalmente, utiliza-se estes parâmetros para reconstruir a edificação. Este método apresentou eficiência na reconstrução das edificações. No pré-processamento, foi utilizada a transformada de HOUGH, para encontrar as retas pertinentes aos limites das edificações, após a utilização de um algoritmo de esqueletonização para o afinamento das bordas, a qual mostrou-se uma ferramenta eficiente que ameniza o deslocamento das bordas e otimiza o processamento da transformada de HOUGH. O método para determinar os planos do telhado consiste em localizar, de modo automático, três pontos que definam um plano e posteriormente a determinação da cumeeira é realizada por meio da interseção dos planos formados.

**Palavras Chaves:** Reconstrução 3D de edificações; Laser scanner aerotransportado.

## ABSTRACT

A building can be reconstructed from its roof, which can be defined by some parameters like orientation, height, ridges and contours. In many models for

building extraction, using Laser scanner raw data, plants are requested to accomplish the precise location of building contours. The purpose of this study is to present a method for building reconstruction using Laser scanner data. For this, the 2D Hough transform is applied to the Laser data, represented as a raster image, to find the borders of the roof. Then, the planes that model the roof are estimated and the form of the roof is derived. The method proved to be efficient in building modeling. In the pre-processing step, the Hough transform and thinning were used to estimate the borders of the buildings. The method to find the planes of the roof is effective and consists of looking for three points that define each plane of the roof. The ridge lines are got by intersecting these planes.

**Keywords:** 3D reconstruction of building; Laser Scanner data airborne.

## 1. INTRODUÇÃO

A automação da reconstrução tridimensional de edificações são requeridos por muitos usuários de Sistema de Informação Geográfico (SIG) tornando-se um foco para pesquisa fotogramétrica nos últimos anos. O SIG utiliza os modelos tridimensionais de cidades como base fundamental para incluir informações adicionais, como por exemplo, quantas pessoas habitam uma determinada edificação, também podendo auxiliar no planejamento de redes de telefonia celular, na análise da circulação de ar nos centros urbanos etc. Atualmente, reconstruções tridimensionais de edificações são produzidas por Fotogrametria aérea convencional ou por procedimentos de medições semi-automáticos em imagens aéreas, integradas a um Modelo Digital do Terreno (LANG E FÖRSTNER, 1996; FÖRSTNER, 1999; SUVEG E VOSELMAN, 2004).

O Modelo Digital do Terreno (MDT) é uma representação do relevo terrestre, geralmente derivado de fotografias aéreas ou por levantamentos topográficos. Este modelo é obtido a partir das coordenadas tridimensionais de pontos localizados na superfície do terreno. Recentemente, em função dos avanços na coleta de dados, um novo conceito foi introduzido, o Modelo Digital Superfície (MDS), que se distingue do MDT por ser uma descrição que envolve a cota superior dos objetos acima da superfície, além do terreno. O MDS pode ser gerado a partir de um par estéreo de fotos aéreas, um par de imagens orbitais ou pelo sistema *Laser scanner* aerotransportado.

O *Laser scanner* aerotransportado é uma tecnologia desenvolvida recentemente e cuja utilização para a obtenção de MDS e reconhecimento de objetos na superfície tem sido alvo de pesquisas nos últimos anos (HAALA ET AL, 1998; VOSELMAN, 1999; GEIBEL E STILLA, 2000; ROTTENSTEINER E BRIESE, 2002; ROTTENSTEINER, 2003; DASH ET AL., 2004; VÖGTLE E STEINLE, 2005). Este sensor pode ser montado em aeronaves ou helicópteros, e é capaz de medir as coordenadas tridimensionais de uma grande quantidade de pontos na superfície terrestre. Atualmente o sistema Laser é capaz de realizar levantamentos

com densidade em torno de 4 pontos/ m<sup>2</sup>, como por exemplo, o OPTECH/INS GPS APPLANIX.

De acordo com VOSSSELMAN (1999), a alta densidade de pontos obtidos, inclusive na face do telhado de uma edificação, torna a detecção automática de edificações mais fácil. Considerando os dados do *Laser scanner*, uma edificação pode ser definida a partir de seu telhado. Logo, os algoritmos propostos para a identificação de edificações em dados *Laser scanner* considerando apenas o telhado, descrevem-no em termos de área, altura, orientação, bordas do contorno e linhas de cumeeira. É possível não apenas detectar edificações e seus contornos aproximados, mas também extrair faces de telhado plano e, assim, criar modelos que se assemelham à estrutura do telhado.

É o alvo deste trabalho apresentar um método para criação automática de modelos de edificação em áreas construídas a partir de dados provenientes do *Laser scanner* aerotransportado. Também, será avaliada a aplicação do algoritmo de esqueletonização integrado ao filtro de SOBEL, com o objetivo da automação e otimização do processo. Nos seguintes capítulos, uma revisão de literatura a respeito deste tema e a metodologia proposta, junto com os resultados e discussões, são apresentados.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Uma grande vantagem do uso de dados derivados de levantamentos *Laser scanner* é a disponibilidade de um elevado número de pontos na superfície do telhado, o que permitiria, em princípio, modelar melhor a geometria do telhado. No entanto, devido à natureza do processo de varredura, não há garantia de que ocorram pontos exatamente nas bordas do telhado. Para contornar esta deficiência, em muitos algoritmos para extração automática de edificação utilizando dados do *Laser scanner* é requerida a planta baixa da edificação para a localização precisa de seus contornos (HAALA E ANDERS, 1997; VOSSSELMAN E DIJKMAN, 2001). Quando a planta baixa não é utilizada os algoritmos restringem sua aplicabilidade.

O resultado obtido depende do modelo proposto para a identificação do telhado. Em uma abordagem simplificada, por exemplo, LEMMENS ET AL. (1997) adotam como modelo geométrico os contornos da edificação, derivados de um mapa, e a altura derivada do *Laser scanner*. Neste caso, o telhado é representado como um plano de altura constante, não levando em consideração as faces dos telhados.

O uso da planta baixa da edificação como base para a reconstrução do telhado pode ser exemplificado pelo trabalho de HAALA E BRENNER (1997) ou CENTENO ET AL (1999), que extraem primitivas de telhado plano de dados de altimetria *Laser scanner*, usando informação adicional de planta baixa para ganho de conhecimento na relação topológica entre os planos do telhados.

HAALA ET AL. (1998) derivam parâmetros para reconstrução tridimensional utilizando-se de primitivas de edificações básicas construídas em um CAD, e por

meio de ajustamento, utilizando o método dos mínimos quadrados, minimiza a distância entre o modelo de superfície digital *Laser scanner* e pontos correspondentes numa edificação primitiva. As bordas das edificações são derivadas da planta baixa. A implementação, neste caso, é limitada para quatro padrões de edificações primitivas e suas combinações. Posterior refinamento tem que ser executado interativamente.

Quando não se dispõe de informação a respeito dos contornos do telhado, eles devem ser encontrados dentro do processo de reconstrução de telhados. Neste caso, o processo pode ser baseado na detecção de bordas em uma imagem bidimensional das alturas presentes na região, pela interseção de planos supostamente sendo partes do telhado, ou a partir da imagem intensidade proveniente de uma câmara fotogramétrica.

Além dos contornos do telhado, outros elementos do mesmo, como a cumeeira, devem também ser determinados para complementar a geometria. Por exemplo, a posição da cumeeira pode ser detectada a partir da interseção dos planos das faces do telhado. Essas faces podem ser identificadas por algoritmos de segmentação (HOOVER ET AL., 1996; GEIBEL E STILLA, 2000; ROTTENSTEINER, 2003). Muitos desses algoritmos requerem a computação dos vetores normais a uma superfície plana. Estes vetores tendem a possuir muito ruído (sinais que não eram esperados), no caso de dados do sistema *Laser scanner* com alta densidade, portanto costumam dar resultados de pouca qualidade. Para contornar esta dificuldade, algoritmos baseados na transformada de HOUGH, expandida para 3D (VOSELMAN, 1999), mostraram ser mais apropriados. A opção consiste em utilizar a transformada de HOUGH tridimensional para estimar os planos que formam o telhado e sua interseção. A vantagem do uso da transformada de HOUGH 3D é que ela é menos sensível a ruídos existentes nas superfícies normais. Esta informação é complementada pelo uso da transformada de HOUGH 2D para determinação do contorno do telhado e assim completar a reconstrução da edificação de forma simples e rápida.

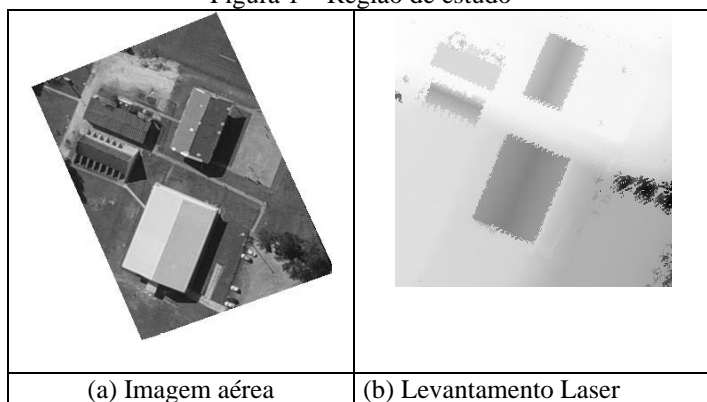
### 3. MATERIAL UTILIZADO

Neste trabalho, foi utilizado um conjunto de pontos do *Laser scanner*, resultante de um levantamento realizado no campus Centro Politécnico na Universidade Federal do Paraná. O sistema utilizado para o levantamento foi o OPTECH / INS GPS APPLANIX, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR). O sistema de referência de coordenadas para o rastreamento foi o WGS84 (*World Geodetic System*, 1984). O levantamento foi realizado com um vôo a uma altura de 1000 metros, sendo a densidade média de coleta de 1 ponto a cada 66 cm tanto em x como em y. A largura da faixa foi de 350 metros com 6 faixas disponíveis.

Dentro do Centro Politécnico foi escolhida uma área próxima ao departamento de educação física devido à região possuir edificações espaçadas entre si (Figura 1).

Pode-se observar que o levantamento Laser (Figura 1b) está orientado em relação ao norte verdadeiro (Figura 1a). O levantamento do sistema *Laser scanner* representado na Figura 1b é uma imagem composta por tons de cinza, em que cada tonalidade representa uma altitude específica levantada pelo Laser, quanto mais escuro maior a altitude e quanto mais claro mais baixa é a altitude do ponto. A esta imagem foi dado o nome de imagem altimétrica. Essa imagem foi definida a partir de uma grade regular com uma resolução espacial de 0,5 m. Para tanto, foram interpolados os dados do Laser utilizando o algoritmo “vizinho mais próximo”. Como a área teste escolhida não possui edificações com grandes elevações, ou seja, possui pequenas regiões com falta de dados (regiões de oclusão) esse algoritmo pode ser utilizado, pois irá garantir o valor altimétrico real mensurado baseando-se no ponto vizinho mais próximo.

Figura 1 – Região de estudo



#### 4. METODOLOGIA

Serão abordados, nas próximas seções, os detalhes relacionados à fase de extração de borda e a detecção dos planos do telhado. Na fase de extração de borda foi aplicado o filtro de SOBEL para obter uma primeira estimativa das bordas do telhado. Posteriormente estas bordas são binarizadas e o esqueleto da imagem resultante é calculado resultando no afinamento das bordas. A seguir, a transformada de HOUGH é utilizada para selecionar a reta que representa cada lado da edificação. Também é realizada a detecção dos planos do telhado, o que proporciona a localização da cumeeira encontrada, a partir da interseção dos planos que representam as faces do telhado.

##### 4.1. Extração das Bordas do Telhado

Partindo dos dados do sistema *Laser scanner*, que foram representados por uma imagem altimétrica (Figura 1b), o filtro de SOBEL pode ser empregado com o intuito de detectar bordas. O cálculo do gradiente local permite detectar a presença

de bordas na imagem, pois a borda é caracterizada por uma região de alto gradiente. Considerando que o gradiente de uma imagem  $f$  na posição  $(x,y)$  é dado pelo vetor da Equação 1.

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

De acordo com GONZALEZ e WOODS (2000), a magnitude do gradiente pode ser calculada pela Equação 2.

$$\nabla F = \left[ G_x^2 + G_y^2 \right]^{1/2} = \text{mag}(\nabla f) \quad (2)$$

O operador de SOBEL considera que os “pixels” mais próximos do centro devem apresentar uma maior influência sobre o mesmo e que o gradiente pode ser calculado analisando a vizinhança 3x3 do “pixel” (Figura 2).

Figura 2 – Máscaras utilizadas no operador de SOBEL

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad e \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

A aplicação dos dois operadores  $G_x$  e  $G_y$  resulta nos gradientes da borda na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente e, por meio destes, é possível a obtenção da magnitude e da direção da borda para cada “pixel” (Equação 2).

As bordas extraídas pelo operador de SOBEL são binarizadas utilizando-se de um limiar fixo. Esse limiar foi estipulado após vários testes, e nota-se que o valor do limiar igual a  $\frac{1}{4}$  da maior frequência do nível de cinza evidenciou as principais bordas da imagem.

#### 4.1.1. Esqueletonização

Segundo GONZALEZ e WOODS (2000), a esqueletonização é a representação da forma estrutural de um objeto e é obtida por meio de um algoritmo de afinamento. A esqueletonização pode fornecer uma representação estrutural da forma mais simples, de modo a facilitar a extração de propriedades como pontos extremos, junções, e conexões ao longo dos objetos em uma imagem. Para um algoritmo de esqueletonização ser eficiente, ele precisa idealmente compactar dados, manter propriedades significativas dos padrões, e eliminar ruídos locais sem introduzir distorções.

Algoritmos de afinamento de bordas excluem pontos, iterativamente, de uma dada região, desde que a extração desses pontos não remova pontos terminais (no final de uma linha), não interrompa conexões, e não cause erosão excessiva na

região. Um algoritmo de obtenção do esqueleto de regiões binárias, proposto por ZHANG E SUEN (1984), consiste em uma erosão progressiva e seletiva do objeto e está dividido em duas etapas, as quais serão dissertadas nos próximos parágrafos. A erosão progressiva é a corrosão das extremidades de uma borda, por exemplo, uma linha grossa, até que permaneça apenas um “pixel” em sua espessura ao longo de seu comprimento.

No caso de uma imagem binária, é assumido que as regiões possuem “pixels” de valor 1, enquanto que os do fundo assumem valor 0 (zero). Tomando-se a definição de vizinhança de 8 (Figura 3), o primeiro passo determina que um ponto de contorno  $p$  deve ser eliminado se as seguintes condições forem satisfeitas:

- a)  $2 \leq N(p_1) \leq 6$
- b)  $S(p_1) = 1$
- c)  $p_2 * p_4 * p_6 = 0$
- d)  $p_4 * p_6 * p_8 = 0$

onde  $N(p_1)$  é o número de vizinhos não-nulos de  $p_1$ , ou seja,  $N(p_1) = p_2+p_3+...+p_8+p_9$ , e  $S(p_1)$  é o número de transições 0-1 na seqüência ordenada  $p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_2$ .

Figura 3 – Estrutura de vizinhança de 8

$p_9$	$p_2$	$p_3$
$p_8$	<b><math>p_1</math></b>	$p_4$
$p_7$	$p_6$	$p_5$

A Figura 4 ilustra as condições (a) e (b) em que suas condições são atendidas.

Figura 4 – Ilustração das condições (A) e (B) para  $N(p_1)=4$  e  $S(p_1) = 4$

0	0	1
1	<b><math>p_1</math></b>	0
1	0	1

No segundo passo, as condições (a) e (b) continuam as mesmas, mas as condições (c) e (d) são substituídas pelas (e) e (f).

- e)  $p_2 * p_4 * p_8 = 0$
- f)  $p_2 * p_6 * p_8 = 0$

#### 4.1.2. Transformada de Hough 2D

Em função do processo de varredura para a coleta dos dados do Laser, bem como da discretização aplicada na geração de uma imagem “raster” antes da filtragem, as bordas encontradas são formadas por pequenos segmentos,

constituindo um polígono irregular, mesmo após a esqueletonização. Por este motivo, os pontos identificados como parte do contorno do telhado devem ser combinados de maneira a gerar um polígono mais regular, eliminando o ruído. Para tanto, é aplicada a transformada de HOUGH 2D que evidencia a melhor reta que pode representar cada lado da edificação.

A transformada de HOUGH aplicada na extração de segmentos lineares consiste em uma operação que permite, partindo das coordenadas bidimensionais dos pontos de uma imagem binária, encontrar o conjunto de retas que melhor se adaptem a este conjunto de pontos. Para isto, os dados originais são transformados a um novo espaço. Tal espaço é definido em termos dos parâmetros das possíveis retas. De acordo com GONZALEZ e WOODS (2000), é considerado, a princípio, que todos os pares de pontos no conjunto original podem formar um segmento de reta. Logo, analisando todas as possíveis combinações é possível identificar as retas mais frequentes. Para isto basta agrupar os parâmetros dos segmentos identificados.

Considerando um par de pontos  $(x_i, y_i)$  e  $(x_k, y_k)$ , pode-se expressar a equação da reta que passa por estes pontos por:

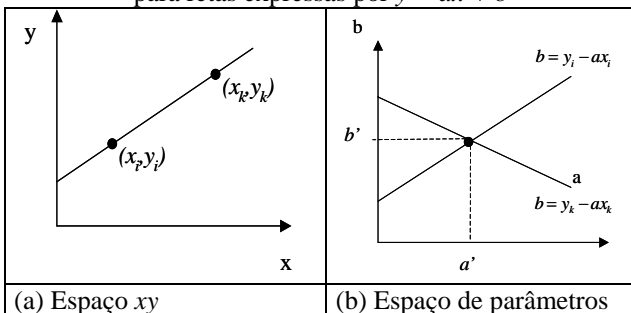
$$y_i = ax_i + b \quad (3)$$

Reescrevendo a Equação 3, obtém-se uma equação em função de dois parâmetros  $(a, b)$ :

$$b = y_i - ax_i \quad (4)$$

Assim sendo, considerando o espaço de parâmetros determinado por  $a$  e  $b$ , a reta derivada a partir do par de pontos (Figura 5<sup>a</sup>) pode ser representada como mostrado na Figura 5b. Todos os pontos contidos nessa linha (Figura 5<sup>a</sup>) estão associados a linhas no espaço de parâmetros que se interceptam em  $(a', b')$  (Figura 5b). Analisando todos os segmentos possíveis na imagem original, uma frequência pode ser quantificada para um grande conjunto de dados  $(a, b)$  gerado, ou seja, é gerado um quadro de acumuladores. Os valores mais frequentes desse quadro devem ser identificados.

Figura 5 – Representação dos espaços envolvidos na transformação de HOUGH para retas expressas por  $y = ax + b$



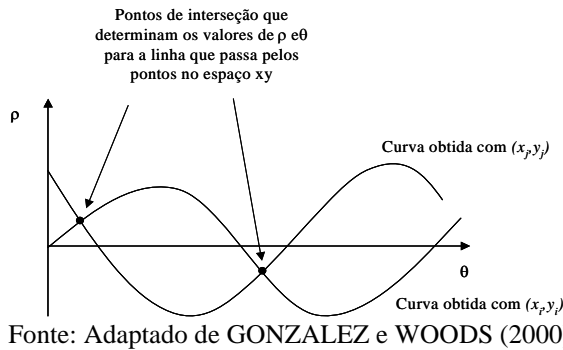


Na representação de linhas, um problema é identificado, no uso da equação geral da reta (Equação 3). Tanto a inclinação quanto o ponto de interseção aproximam-se do infinito a medida que a linha se torna vertical. Uma maneira de contornar essa dificuldade é através do uso da representação normal de uma linha (Equação 5).

$$x \cos(\theta) + y \sin(\theta) = \rho \tag{5}$$

O uso dessa representação (Equação 5) na construção do quadro de acumuladores (valores mais frequentes) dos parâmetros  $\rho$  e  $\theta$ , é idêntico ao do método na representação da equação geral da reta. Porém, no lugar de linhas retas, curvas senoidais são formadas no plano  $\rho\theta$  (Figura 6). Do mesmo modo que antes,  $M$  pontos colineares de uma linha  $x \cos(\theta_i) + y \sin(\theta_i) = \rho_j$  levam a  $M$  curvas senoidais que se interceptam em  $(\rho_i, \theta_j)$ .

Figura 6 – Transformada de HOUGH utilizando a parametrização  $\rho\theta$



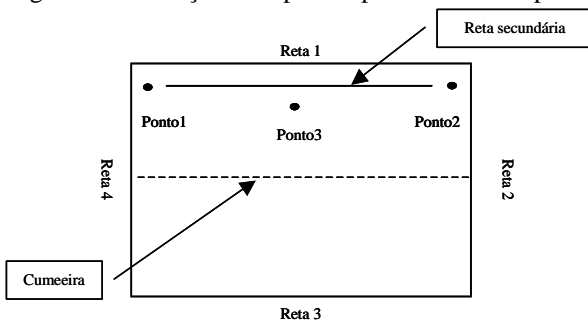
#### 4.2. Detecção dos Planos do Telhado e Cumeeira

Nesta etapa, são definidas as equações dos planos que representam as faces do telhado de cada edificação (polígono) e simultaneamente são verificados quais os pontos pertencem a este plano. Como três pontos definem um plano, foram escolhidos automaticamente, três pontos dentro do polígono que mais se aproxima de cada borda, definida no passo anterior.

Como pode ser observado na Figura 7, nota-se que próximo a “Reta 1” foram escolhidos (de forma automática), três pontos – dois desses próximos as extremidades do segmento da “reta 1” (pontos 1 e 2). Com estes dois pontos, gera-se uma “reta secundária” virtual. Calculando-se a coordenada de um ponto na metade dessa reta virtual, toma-se um terceiro ponto (ponto 3) próximo a esta

coordenada, tal que este ponto pertença à edificação em questão e que não seja colinear.

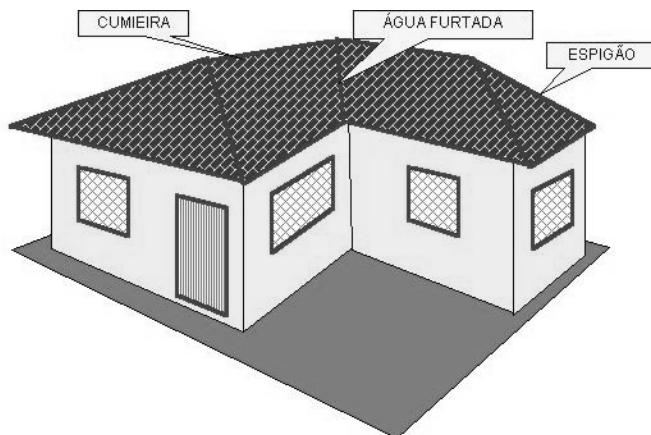
Figura 7 – Detecção de 3 pontos pertencentes ao plano



Para garantir que o terceiro ponto pertença a edificação foi verificado se a altitude do mesmo não difere dos outros dois em 1 m, pois se este fato ocorrer o ponto pertence ao solo e não ao telhado. Essa etapa é repetida para cada uma das arestas do polígono.

Como já mencionado, os três pontos possibilitam determinar um plano que representa uma face da edificação. A validade deste plano é verificada a partir do cálculo do afastamento dos pontos pertencentes aos dados Laser com os pertencentes ao plano. Para telhados com quatro ou mais faces (Figura 8), procede-se da mesma maneira descrita anteriormente (Figura 7). Já para telhados com apenas uma face será encontrado apenas um plano, pois cada aresta da edificação formará um plano que irá sobrepor o plano encontrado da aresta anterior, devido os 3 pontos encontrados sempre pertencerem ao mesmo plano.

Figura 8 – Características de um telhado



Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/telhado/tlh3.htm> acesso em 31/09/2006

Finalmente, para encontrar a linha que representa a cumeeira ou no caso de telhados com mais de duas faces, água furtada e/ou espigão, são calculadas as interseções entre os planos que representam cada face da edificação. No caso de edificações com apenas uma face, não ocorrerá interseção entre planos, devido existir apenas um único plano, logo a borda do plano coincidirá com a borda da edificação.

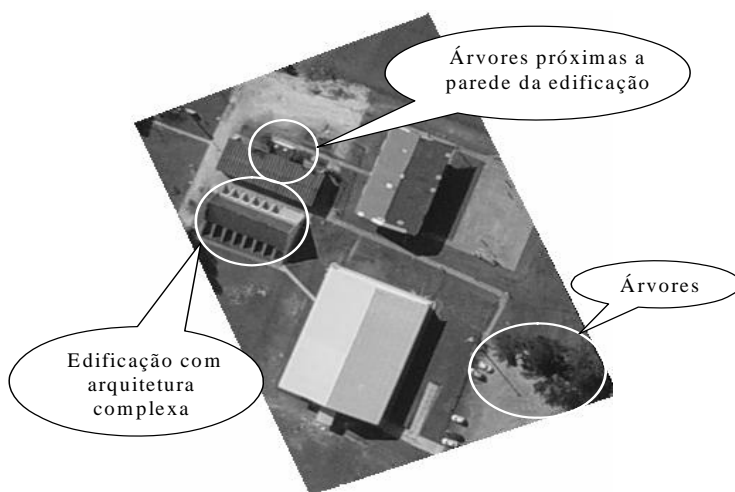
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os processos apresentados na metodologia (seção 4) foram implementados em linguagem C++. O programa subdivide-se nos seguintes módulos: Extração de Bordas e Detecção de Planos.

### 5.1. Extração das Bordas

Como pode ser observado na Figura 9, na região do experimento existe a ocorrência de vegetações como árvores e arbustos, árvores próximas à parede de uma das edificações, e uma edificação com arquitetura complexa. As árvores e arbustos podem ser encontrados realizando-se uma diferença entre o primeiro e o segundo pulso, somados à dados da reflectância, em uma classificação (HUG E WEHR, 1997). Para este trabalho serão avaliadas as edificações mais comuns, portanto foram eliminados os pontos levantados pelo *Laser scanner* que representavam estas árvores e a edificações com arquiteturas complexas.

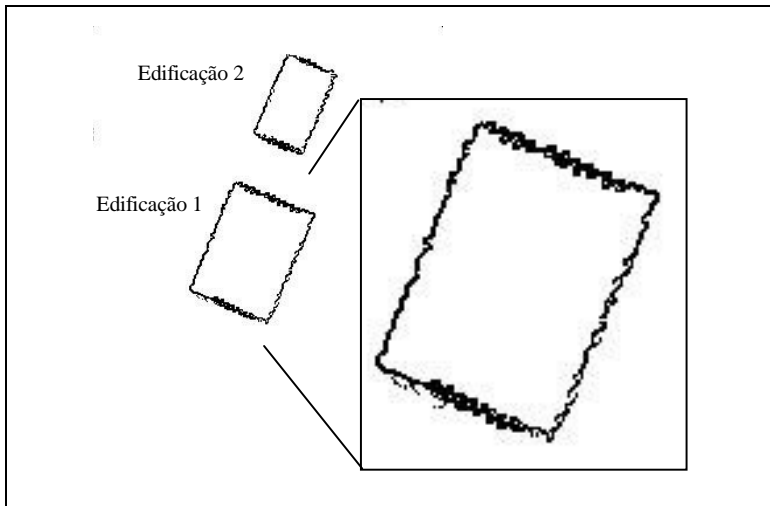
Figura 9 – Imagem aérea



Para a extração das bordas das edificações pode-se utilizar o operador de canny. Porém este operador tende a apresentar muitos detalhes na superfície do telhado. Esse fato ocasiona uma interação e esforço maior do usuário para extrair da edificação suas principais bordas, que são seus limites exteriores, localizados juntos a suas paredes. Um dos propósitos deste trabalho está na automação da reconstrução tridimensional de edificações, assim, a utilização de um operador mais simples pode evitar a semi-automatização. Neste trabalho, foi utilizado o filtro de SOBEL para a extração das bordas.

Na Figura 10 pode-se observar o resultado da aplicação do filtro de SOBEL e sua binarização na imagem altimétrica apresentada pela Figura 3.1b. Nota-se que foram eliminadas as bordas de árvores e arbustos, assim como bordas de edificações com árvores próximas a suas paredes, situações que serão abordadas e investigadas em trabalhos futuros.

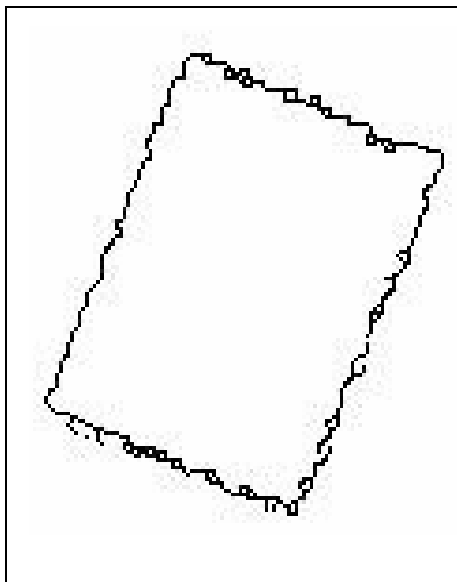
Figura 10 – Detecção de bordas



Como pode ser observada na Figura 10, a borda das edificações geradas pelos operadores de SOBEL são muito grossas e irregulares (muitos ruídos), o que implica em um processamento mais lento se for aplicada a transformada de HOUGH. Uma solução para este problema é a aplicação do algoritmo de esqueletonização.

Na Figura 11 é mostrado o resultado do processo de esqueletonização para afinar as bordas e encontrar o menor número de “pixels” que represente a borda.

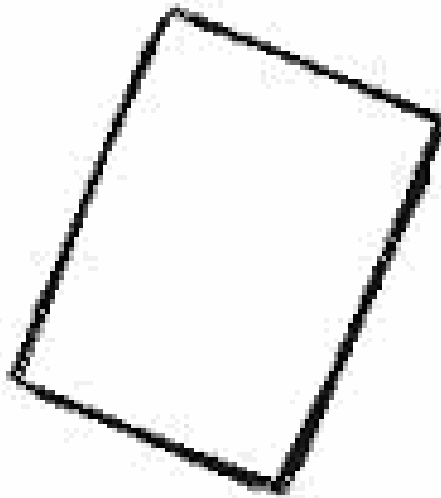
Figura 11 – Afinamento das bordas de SOBEL



Comparando as Figuras 10 e 11 nota-se que os “pixels” que representam as bordas das edificações foram expressivamente reduzidos, o que auxiliará na redução de iterações e acarretará em um menor processamento.

À imagem correspondente ao esqueleto das bordas (Figura 11) foi aplicada a transformada de HOUGH. A transformada de HOUGH pode acarretar em múltiplas retas que representam a mesma borda (Figura 12), portanto como solução para este problema foi escolhida a reta média entre as múltiplas retas que representam uma borda. Finalmente, realizada a interseção entre retas, encontrando-se assim os pontos dos cantos da edificação.

Figura 12 – Múltiplas retas obtidas após a transformada de HOUGH



Com a intenção de avaliar o efeito da esqueletonização na definição do contorno do telhado, a transformada de HOUGH 2D também foi aplicada às bordas resultantes do filtro de SOBEL, sem esqueletonização. Esse experimento foi executado para duas edificações. O resultado foi um polígono regular para cada edificação. Constatou-se um deslocamento entre os métodos. Esta diferença foi numericamente avaliada analisando a distância entre os cantos de cada polígono (Quadro 1). Sendo o “canto 1” igual ao canto inferior esquerdo, o “canto 2” canto inferior direito, “canto 3” o canto superior direito e o “canto 4” o canto superior esquerdo.

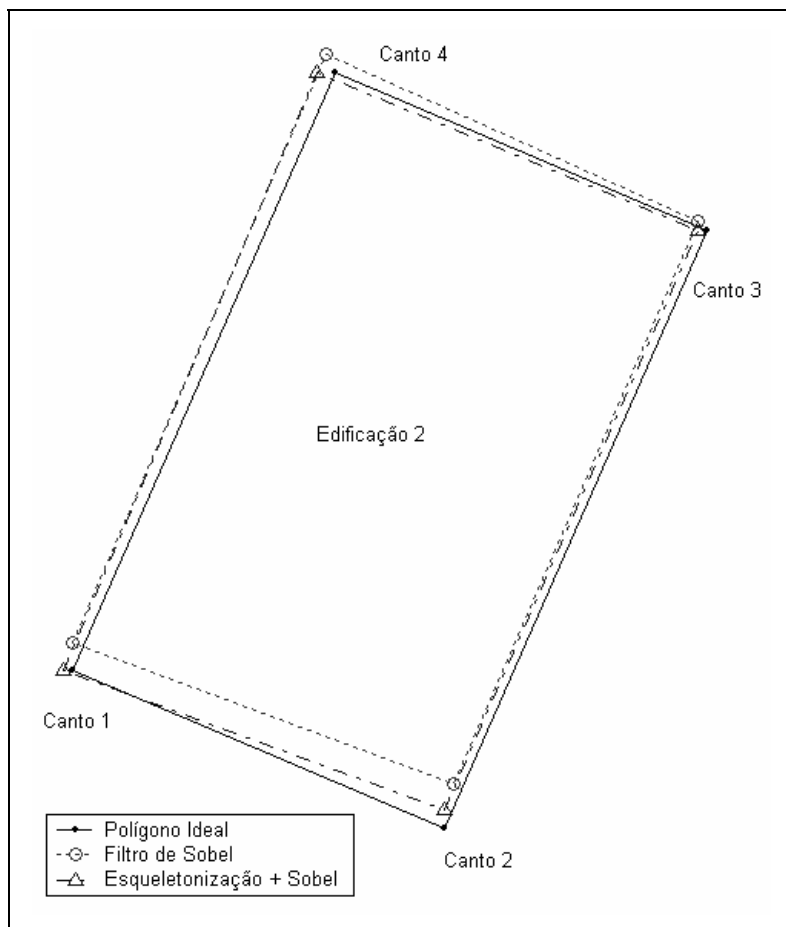
Quadro 1 – Distância entre os cantos encontrados pelos dois métodos (SOBEL) e (SOBEL + ESQUELETONIZAÇÃO), em “Pixels”

<b>Cantos</b>	<b>Edificação 1</b>	<b>Edificação 2</b>
1	3	4
2	3	4
3	0	1
4	1	2
Média	1,75 pixels	2,75 pixels

Considerando que a resolução espacial da varredura do Laser é de 0,5m, nota-se, a partir do Quadro 1, que existem diferenças significativas, de até 2,0 m, entre os polígonos. Para a edificação 1 nota-se um deslocamento médio de 0,87 m, e para a edificação 2 um deslocamento de 1,37 m em média.

Finalmente, foi realizada uma comparação entre as bordas resultantes desses dois procedimentos em relação a um polígono resultante da interpretação visual da imagem, considerado um polígono de referência. A Figura 13 mostra a superposição dos polígonos gerados pela transformada de HOUGH utilizando as bordas explicitadas por meio do filtro de SOBEL e pela esqueletonização aplicada ao filtro de SOBEL.

Figura 13 – Retas da transformada de HOUGH sobrepostas ao polígono de referência



Observando-se a Figura 13, nota-se, em ambos os casos, um afastamento em relação ao polígono de referência. Este afastamento foi quantificado utilizando a distância de cada canto do polígono em relação ao polígono de referência. As distâncias processadas podem ser verificadas no Quadro 2 (a numeração dos cantos segue a mesma ordem descrita para o Quadro 1).

Quadro 2 – Distância entre cantos encontrados em relação à posição de referência em “pixels”

Edificação	Canto	Diferença	
		Esqueletonização + Sobel	SOBEL
1	1	2	1
1	2	3	2
1	3	1	1
1	4	1	1
2	1	1	3
2	2	2	5
2	3	0	1
2	4	2	2
<b>média</b>		<b>1,5</b>	<b>2,0</b>

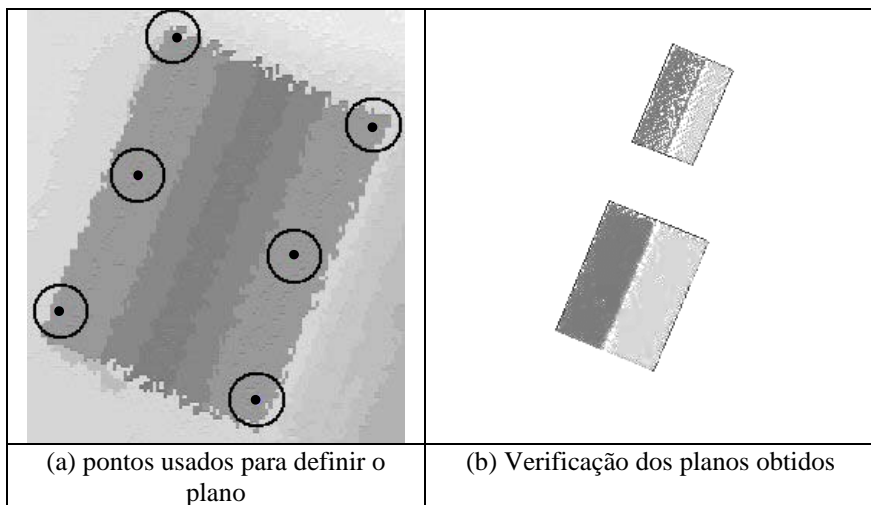
Observando o Quadro 2 (Edificação 1), nota-se que o polígono encontrado utilizando-se das bordas do filtro de SOBEL é um resultado um pouco melhor que o da esqueletonização aplicada ao SOBEL. Já para a segunda edificação, a esqueletonização apresentou um melhor resultado. Comparando os valores médios da diferença de cada polígono ao polígono ideal, conclui-se que a utilização da esqueletonização, após a etapa de extração de borda e transformada de HOUGH, proporciona uma melhor aproximação dos contornos do telhado. Por este motivo, este resultado foi utilizado nas fases seguintes.

### 5.1. Detecção dos Planos do Telhado e da Cumeeira

Utilizando-se do polígono gerado a partir da esqueletonização, foi aplicado o método de escolha de pontos e detecção dos planos do telhado (seção 4.2), o que pode ser visualizado na Figura 14. Na Figura 14a são apresentados os pontos usados para definir os planos das faces do telhado. Esses pontos foram plotados na imagem altimétrica original com o intuito de visualizar a situação real em que se encontram e na Figura 14b o resultado dos planos encontrados com essa metodologia.



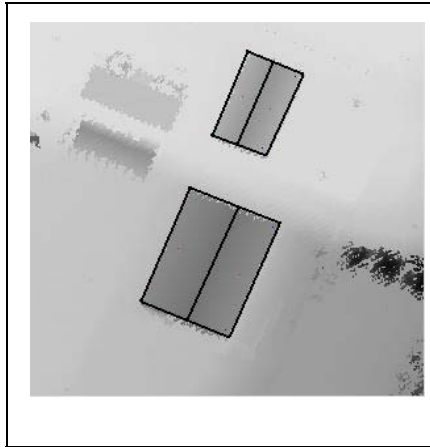
Figura 14 – Estimativa de planos



Observando-se a Figura 14a, nota-se que todos os pontos usados para definir o plano da face do telhado (pontos sementes), estão dentro da edificação, o que possibilita a geração dos planos pertencentes ao telhado. A Figura 14b apresenta todos os pontos pertencentes a cada face do telhado, que neste caso são edificações com duas águas, ou seja, duas faces. Pode-se observar que a maioria dos pontos do telhado foi bem modelada pelos dois planos inclinados. Nota-se que nas regiões próximas da cumeeira alguns pontos não foram identificados como pertencentes ao plano (Figura 14b – região em branco próxima a cumeeira). Esse fato ocorre devido a face de um telhado possuir muitos ruídos. Esses ruídos são ocasionados por galhos secos de árvores, folhagens, telhas quebradas, rebatimento do pulso do Laser etc.

A interseção dos planos obtidos possibilita a estimativa da posição da cumeeira do telhado, como é mostrado na Figura 15.

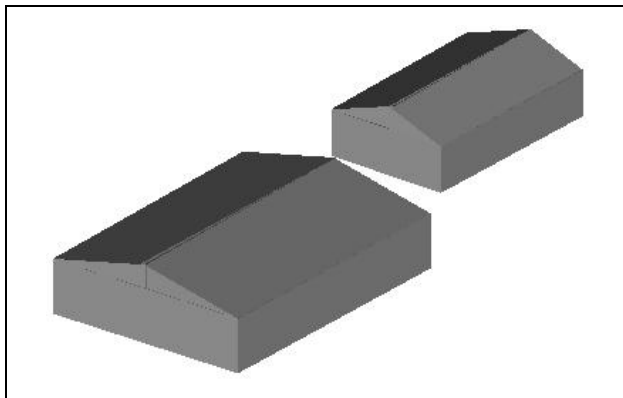
Figura 15 – Cumeeira das edificações



### 5.3. Reconstrução Tridimensional

Para um efeito visual, foram utilizados os dados adquiridos nas etapas anteriores (bordas e cumeeira), o que pode ser observado na Figura 15, e por meio do AUTOCAD, foi realizada a renderização dos planos descritores dos telhados com um exagero vertical de 5 vezes, realizando assim a reconstrução 3D dos telhados das edificações (Figura 16).

Figura 16 – Reconstrução 3D usando CAD



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um método de estimativa da geometria de telhados, a partir de dados do *Laser scanner* aerotransportado, baseado na detecção dos contornos do telhado e a aproximação de planos, foi apresentado. O método mostrou ser eficiente para edificações com telhados simples e espaçados entre si.

O uso da esqueletonização após o filtro de SOBEL comprovou ser mais eficiente para o posicionamento de um polígono que represente as bordas da edificação. Porém, estes resultados devem ser melhor verificados. A vantagem do uso da esqueletonização é que ela melhora a velocidade do processamento da transformada de HOUGH, pois este depende do número de pontos utilizado para representar as bordas.

A utilização do filtro de SOBEL e consecutivamente a esqueletonização e a transformada de HOUGH demonstrou ser uma metodologia interessante na automação de reconstrução bidimensional.

Para este trabalho, a escolha de três pontos para representarem um plano que defina a face de um telhado foi eficiente, porém recomenda-se a escolha de pontos mais próximos do centro de gravidade da face do telhado devido à possibilidade desses pontos próximos aos cantos do telhado pertencerem a uma outra face, como por exemplo, nos telhados com quatro faces (águas). Também recomenda-se a utilização de ajustamentos para que seja encontrado coeficientes da equação do plano mais representativos aos pontos pertencentes a face do telhado.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BALTSAVIAS, E.; 1999: *Airbone Laser scanning: existing systems and firms and other resources*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, Parte 2-3, pp.164-198.
- CENTENO, J. S.; KISHI, R. T.; BÄHR, H. P.; 1999. *Recognition of building using scanned maps and Laser scanner altitude data*. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, pp. 19-28.
- DASH, J.; STEINLE, E.; SINGH, R. P.; BÄHR, H. P.; 2004 *Automatic building extraction from Laser scanning data: an input tool for disaster management*. Advances in space research, Vol 33, pp. 317-322.
- FÖRSTNER, W.; 1999. *3D city models: Automatic and semiautomatic acquisition methods*. D. Fritsch and R. Spiller (eds), Photogrammetric Week'99, Wichmann Verlag, pp. 291-303.
- GEIGEL, R.; STILLA, U.; 2000. *Segmentation of Laser Altimeter Data for Building Reconstruction: Different Procedures and Comparison*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B3, pp. 326-334.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E.; 2000. *Processamento de imagens digitais*. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 527 p.

- HAALA, N.; ANDERS, K.-H.; 1997. *Acquisition of 3D urban models by analysis of aerial images, digital surface models and existing 2D building information*. SPIE Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III, SPIE Proceedings Vol. 3072, pp.212-222.
- HAALA, N.; BRENNER, C., 1997. *Generation of 3D city models from airborne Laser scanning data*. Proc. 3rd EARSEL Workshop on LIDAR Remote Sensing on Land and Sea. Tallinn, Estonia, 17–19 July, pp. 105–112.
- HAALA, N.; BRENNER, C.; ANDERS, K.-H.; 1998. *3D urban GIS from Laser altimeter and 2D map data* IAPRS, Vol. 32 - 3/1, Columbus, OH, pp. 339–346.
- HOOVER, A. et al. 1996. *An experimental comparison of range image segmentation algorithms*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 18, Nº 7, pp. 673-689.
- HUG, CH.; WEHR, A.; 1997. *Detecting and identifying topographic objects in imaging Laser altimetry data*. IAPRS, Vol. 32, Part 3-4W2, pp. 19–26.
- LANG, F.; FORSTNER, W.; 1996. *3D-city modeling with a digital one-eye stereo system*. IAPRS, Vol. 31, Part B4, pp. 261–266.
- LEMMENS, M.; DEJKERS, H.; LOOMAN, P.; 1997. *Building detection by fusing airborne Laser-altimeter DEMs and 2D digital maps*. IAPRS, Vol. 32, Part 3-4W2, pp. 29–42.
- ROTTENSTEINER, F.; 2003. *Automatic generation of high-quality building models from lidar data*. IEEE Computer Graphics and Applications, Nov/Dec, pp.42-50.
- ROTTENSTEINER, F.; BRIESE, C.; 2002 *A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data*. IAPRSIS, Vol 34/3A, Graz, Austria, pp. 295-301.
- SUVEG, I.; VOSSELMAN, G.; 2004. *Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 58, pp. 202– 224.
- VÖGTLE, T.; STEINLE, E.; 2005. *Detection and recognition of changes in building geometry derived from multitemporal Laser scanning data*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, Part B. Commission 2.
- VOSSELMAN, G.; 1999. *Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data*. IAPRS, Vol. 32 – 3/ 2W5, Munich, Germany, pp. 87–92.
- VOSSELMAN, G.; DIJKMAN, S.; 2001. *3D building model reconstruction from point clouds and ground plans*. IAPRSIS, Vol. 32-3/W4, Annapolis, Maryland, pp. 37–43.
- ZHANG, T. Y.; SUEN, C. Y.; 1984. *A fast parallel algorithm for thinning digital patterns*, Comm. ACM, Vol. 27, Nº 3, pp 236-239.

(Recebido em dezembro de 2005. Aceito em novembro de 2006)