

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N<sup>o</sup> 66/1: 87-103  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **AJUSTAMENTO EM BLOCO DE FAIXAS DO LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO (ALS)**

*Block adjustment of Airborne Laser Scanner Strips*

**Plinio Temba<sup>1</sup> & Philippe Maillard<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG  
Departamento de Cartografia**

Avenida Antonio Carlos, 6627 - Campus universitário, Belo Horizonte/MG, Brasil. CEP: 31270-901  
temb@cart.igc.ufmg.br

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG  
Departamento de Geografia**

Avenida Antonio Carlos, 6627 - Campus universitário, Belo Horizonte/MG, Brasil. CEP: 31270-901  
philippermaillard@yahoo.com.br

*Recebido em 28 de Março, 2013/ Aceito em 23 de Agosto, 2013  
Received on March 28, 2013/ Accepted on August 23, 2013*

### **RESUMO**

A discrepância vertical na zona de sobreposição lateral é uma distorção da medida original de difícil correção decorrente da varredura realizada pelo sensor laser, em particular, residente nos extremos laterais da faixa de vôo. A pesquisa faz uma avaliação dos resultados dedicados ao ajustamento simultâneo do bloco que pode atender, entre outros, a redução da discrepância vertical. É adotado o polinômio isogonal de Helmert no espaço para modelar o comportamento da superfície amostrada. O estágio seguinte promove estratégias que apontam uma função matemática capaz de estimar os parâmetros de orientação interna do sensor laser, inerente ao processo de medição. A metodologia revela um procedimento analítico que simplifica algoritmos e operadores matemáticos, estima os parâmetros do modelo isogonal para a amostragem dos pontos distribuída espacialmente sobre o bloco de faixas e modifica técnicas dedicadas ao ajustamento.

**Palavras chaves:** Lidar, Ajustamento Simultâneo do Bloco de Faixas do ALS, Discrepância Vertical.

### **ABSTRACT**

The vertical discrepancy in the overlapping areas of the laser scanner strips is a distortion of the original measure hard to correct due to the profiling realized by the laser sensor, especially when located on the laser scanner strip edges. This research makes an evaluation of the results dedicated to the simultaneous adjustment of the block, which may result, among other things, in the correction of the vertical discrepancy. The Isogonal Affine Transformation is adopted in the area with the purpose of shaping the behavior of the sampled surface. In the following stage, it introduces strategies toward a mathematical function capable of reducing the influence of the residues and/or distortions inherent in the measuring process. The methodology presented in this article establishes an analytical method that simplifies algorithms and mathematical operators that enable an estimate of the parameters of the isogonal model for the sampling of points distributed spatially over the block of strips and modifies the adjustment procedure.

**Keywords:** Lidar, Simultaneous Block Adjustment of ALS's Strips, Vertical Discrepancy.

## 1. INTRODUÇÃO

As contribuições que a tecnologia de Laser Scanner Aerotransportado (ALS), trouxeram para as atividades de mapeamento topográfico. Em pouco mais de uma década a tecnologia do ALS revolucionou o entendimento das técnicas apuradas e tradicionalmente praticadas para o levantamento da superfície física, seja edificada, cultivada ou natural.

O artigo relata procedimentos dedicados ao ajustamento de pontos no terreno aeronavegado com o ALS para atender ao refinamento das observações decorrentes do perfilamento à laser e, conseqüentemente, à aderência mais eficiente a superfície terrestre gerada pelo modelo digital de terreno (MDT) quando comparado com os pontos originais.

## 2. LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO (ALS)

A arquitetura do ALS (sigla em inglês para *airborne laser scanner*) depende do funcionamento de três importantes dispositivos (Figura 1). Um emissor/receptor do sinal luminoso, um receptor GPS de dupla frequência e uma unidade de medição inercial (IMU).

A tecnologia GPS adotada pelo ALS é expressa por um equipamento composto por receptores e decodificadores de sinais de uma constelação de satélites artificiais que determinam a localização geográfica na superfície terrestre. O método empreendido no levantamento com o sistema ALS é conhecido como cinemático em tempo real. A sigla RTK (*Real Time Kinematic*) é, às vezes, adotada nos textos científicos. O procedimento destinado ao perfilamento com o ALS prevê a colocação de antenas nas asas e no dorso da aeronave durante o voo. Assim são determinadas as coordenadas geográficas do sensor laser no momento da emissão do sinal (com precisão posicional centimétrica).

A unidade de medição inercial (IMU) é um mecanismo de navegação eletrônica usado para determinação da posição e registro do controle dos movimentos do sensor em operação. O funcionamento do equipamento baseia-se em medições das acelerações e velocidades angulares do corpo em movimento em relação

a determinado sistema de referência (TORRES & HEMERLY, 2001; Al-BAYARI, 2000). As medições são obtidas por instrumentos que adotam as leis newtonianas de movimento. São componentes comuns na arquitetura dos aparelhos os dispositivos conhecidos como girômetros e acelerômetros. Os girômetros medem as rotações e os acelerômetros, as acelerações da aeronave. Através de processos de integração, torna-se possível obter velocidade e posição, bem como determinar a orientação do corpo.

O emissor laser é o componente do ALS responsável pela emissão e recepção do sinal. O emissor/receptor laser utiliza para realizar observações, a técnica de varredura óptico-mecânica com pulsos laser (NEWBY & MRSTIK, 2005; DALMOLIN et al. SANTOS, 2005; DALMOLIN & SANTOS, 2004). A medida de distância compreendida entre o sensor e o objeto iluminado é estimada com o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção do sinal. Além disso, seguem os autores, é um sistema composto de três elementos fundamentais para o funcionamento do instrumento: 1) o gerador de pulsos, 2) o conjunto óptico de emissão e recepção do pulso e 3) o detector de sinais.

O primeiro, o gerador de pulsos, é responsável pelo estímulo do cristal (Nd: YAG símbolo do elemento *Neodimium: Ytrium Aluminum Garnet*), realizado através de um diodo semiconductor para a emissão da radiação amplificada da luz. Em seguida, o conjunto óptico de lentes e espelhos orienta os pulsos emitidos pelo sensor laser para os objetos e capta os sinais de retorno e direciona para o receptor e, finalmente, o detector de sinais que recebe um sinal analógico (óptico) transforma o sinal analógico em digital por meio de um conversor analógico/digital. O sinal digital da radiação refletida passa por um filtro de suavização (operador matemático) que verifica se o sinal recebido possui a mesma intensidade emitida.

Ao mesmo tempo em que a estrutura física do equipamento responde pela eficiência das medições é também fonte de incertezas e fragilidades.

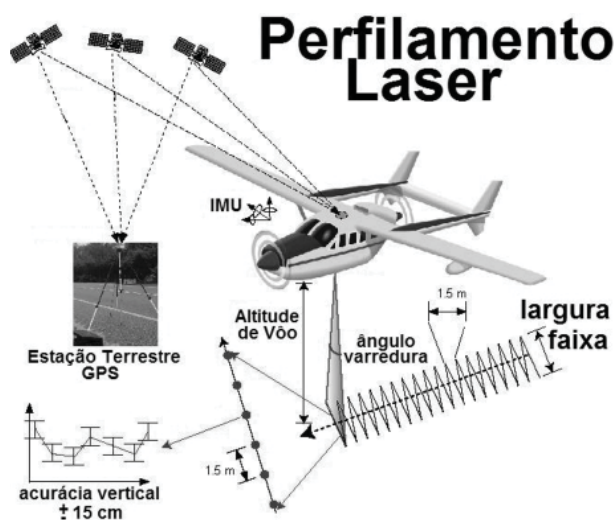


Fig. 1 - Componentes do ALS

Os três componentes do ALS funcionam de modo autônomo. Ao acionar o sensor, o GPS e a unidade de medição inercial iniciam o registro de coordenadas posicionais e atitude, respectivamente. Cabe, ao emissor/receptor a estimativa da distância que separa o objeto, termo em inglês para *range*.

A presunção da sincronia dos dispositivos é apenas teórica, pois as taxas de transmissão são distintas para cada um dos elementos envolvidos e requer um custo de processamento elevado. HYYPPÄ (2011) detalha uma complexa rotina para obter a calibração do sensor.

O ALS pode gerar observações da superfície iluminada. O levantamento aeronavegado cria uma rede discreta de pontos que atende às modelagem digital da superfície física (MDT) e modelagem digital da superfície elevada (MDE). Além disso, suprem com as medições realizadas, as localidades aonde as tradicionais técnicas praticadas com aerofotogrametria, sensoriamento remoto e topografia eletrônica não atingem resultados esperados. São exemplos de aplicações; a malha viária de projetos tradicionais de engenharia civil tais como o mapeamento de linhas de transmissão da energia elétrica, a extração automática de feições ou mesmo os subsídios necessários à classificação de imagens aéreas e orbitais. Segundo CROMBAGHS et al.(2002) e BRETAR et al.(2003) devido à limitação radiométrica da cena criada pelo sensor denominada *imagem de densidade*, é conveniente combinar a nuvem de pontos produzida pelo sensor laser com as imagens obtidas de fotografias aéreas digitalizadas

matricialmente ou imagens de plataformas orbitais, para as atividades de fotointerpretação.

Por outro lado, os especialistas do ALS se debruçam há tempos para alcançar uma metodologia que possibilite minimizar a influência de resíduos residentes nas zonas de sobreposição lateral entre as diversas faixas de voo (KAGER, 2004; KRAUS, 2002; KORNUS & RUIZ, 2003). O fenômeno se deposita, sobretudo, no componente vertical do terno de observações gerado pelo sensor. São duas as causas principais; 1) as observações na zona de sobreposição lateral entre faixas é navegado de duas posições pela aeronave e, 2) as bordas sofrem distorções mais severas do que a região sobre a zona central da faixa. A metodologia proposta vai ao encontro dos estudos para corrigir as fragilidades do sistema de medição do sensor laser.

### 3. DISCREPÂNCIA VERTICAL

SCHENK, 2001, destaca a ocorrência de uma distorção, de difícil solução, que afeta as bordas das faixas do perfilamento e recebe o nome de *discrepância vertical*. Apesar do cuidado no processo de calibração do ALS, a discrepância afeta todas as observações amostradas sobre a superfície iluminada que ocupam as bordas laterais das faixas. A discrepância vertical ( $\Delta z$ ), na Figura 2, é causada pelo erro angular na orientação do feixe de laser. A imagem evidencia a diferença vertical atribuída a dois pontos que apesar de compartilharem as coordenadas geográficas divergem em relação à coordenada altimétrica.

A técnica de interpolação analítica descrita pela pesquisa minimiza a influência da discrepância vertical nas Zonas de Sobreposição Lateral (ZSL)

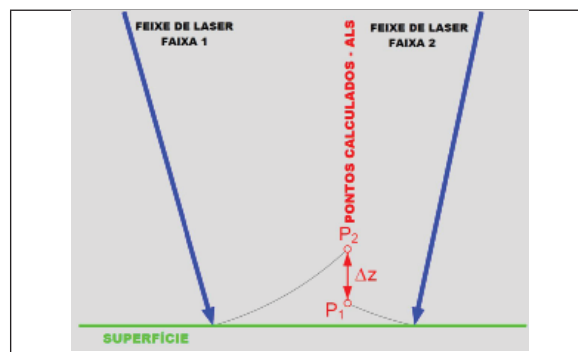


Fig. 2 - Perfilamento com a discrepância vertical ( $\Delta Z$ )

Três planos concorrentes e convergentes se interceptam segundo um ponto P, a Figura 3 mostra a propriedade. A solução do sistema de equações propõe o método de Cramer para determinar as coordenadas do marco que expressa a interseção entre as os planos que pertencem a duas faixas contíguas. O elenco correspondente às três equações dos planos homólogos pode ser solucionado pelo método.

As três faixas do perfilamento abordadas na pesquisa revelam duas ZSLs e, particularmente, neste setor será criado para cada nove planos concorrentes um ponto homólogo. Os nove planos se distribuem da seguinte forma; os cinco primeiros planos são posicionados sobre a faixa esquerda e os quatro restantes sobre a faixa à direita. A Figura 3 ilustra a distribuição dos planos sobre as faixas de levantamento correspondentes. Cabe lembrar que o círculo é apenas uma forma de representação dos planos homólogos, pois são definidos pelo modelo matemático apurado com a regra de Cramer.

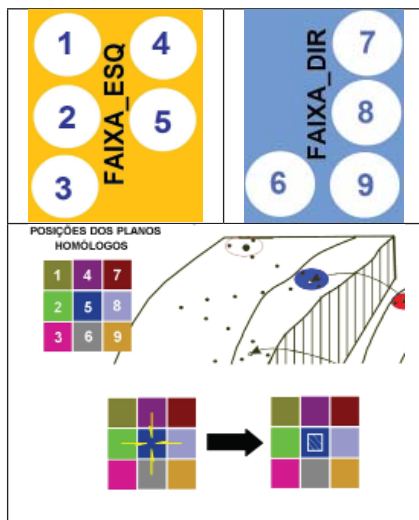


Fig. 3 - Posicionamento de um dos polígonos que abrigam o plano homólogo sobre a ZSL

Para calcular o ponto homólogo é crucial a seleção de três planos concorrentes que possam atender a condição geométrica de corrigir a discrepância vertical. A Figura 4 ilustra o efeito obtido quando as coordenadas calculadas pelo método de Cramer estimam a localização de um ponto sobre a superfície amostrada decorrente da combinação de três planos concorrentes, sendo dois planos de uma faixa e o terceiro da faixa vizinha.

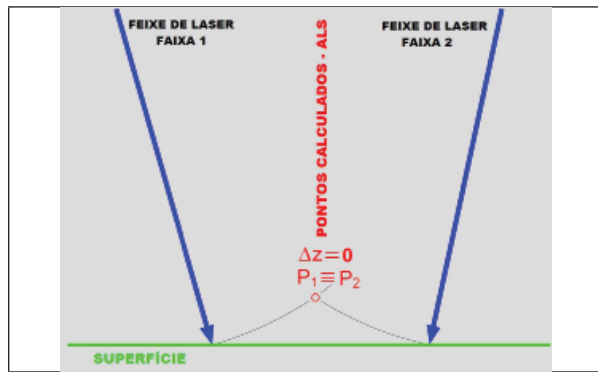


Fig. 4 - Perfilamento sem a discrepância vertical (DZ)

O ponto de interseção entre os três planos concorrentes criados é o ponto de apoio suplementar - ponto homólogo. O processo destinado ao cálculo do ponto homólogo é repetido nas duas ZSLs residentes no interior do bloco de faixas e recebem uma seqüência de números pares. Inicia no 10102 e termina no 10224.

Duas rotinas modulares foram criadas no MATLAB para agir como filtros; o primeiro dedicado a criar todas as combinações possíveis de três planos dentre os nove gerados e, o segundo visa garantir que as combinações praticadas para o cálculo do ponto – homólogo fosse híbrida. Isso significa que pelo menos um deles pertença à faixa homóloga (à esquerda ou à direita) diferente daquela que abriga os dois outros planos.

Não obstante, a preocupação com a obtenção de medidas que levem a determinação da matriz dos coeficientes quadrada e não singular, houve um condicionante adicional incorporado a rotina do MATLAB. Todas as coordenadas calculadas para o ponto homólogo não podem convergir para um valor que se fizesse superior a 8m do marco parcial homólogo, pois as atividades de campo dedicadas ao levantamento de coordenadas com receptores GPS nos logradouros públicos se tornam mais ágeis do que a realização em propriedades particulares que, inexoravelmente, demandam de solicitações e trâmites burocráticos para acesso. O fluxograma das atividades dedicadas ao ajustamento é resumido na Figura 5.



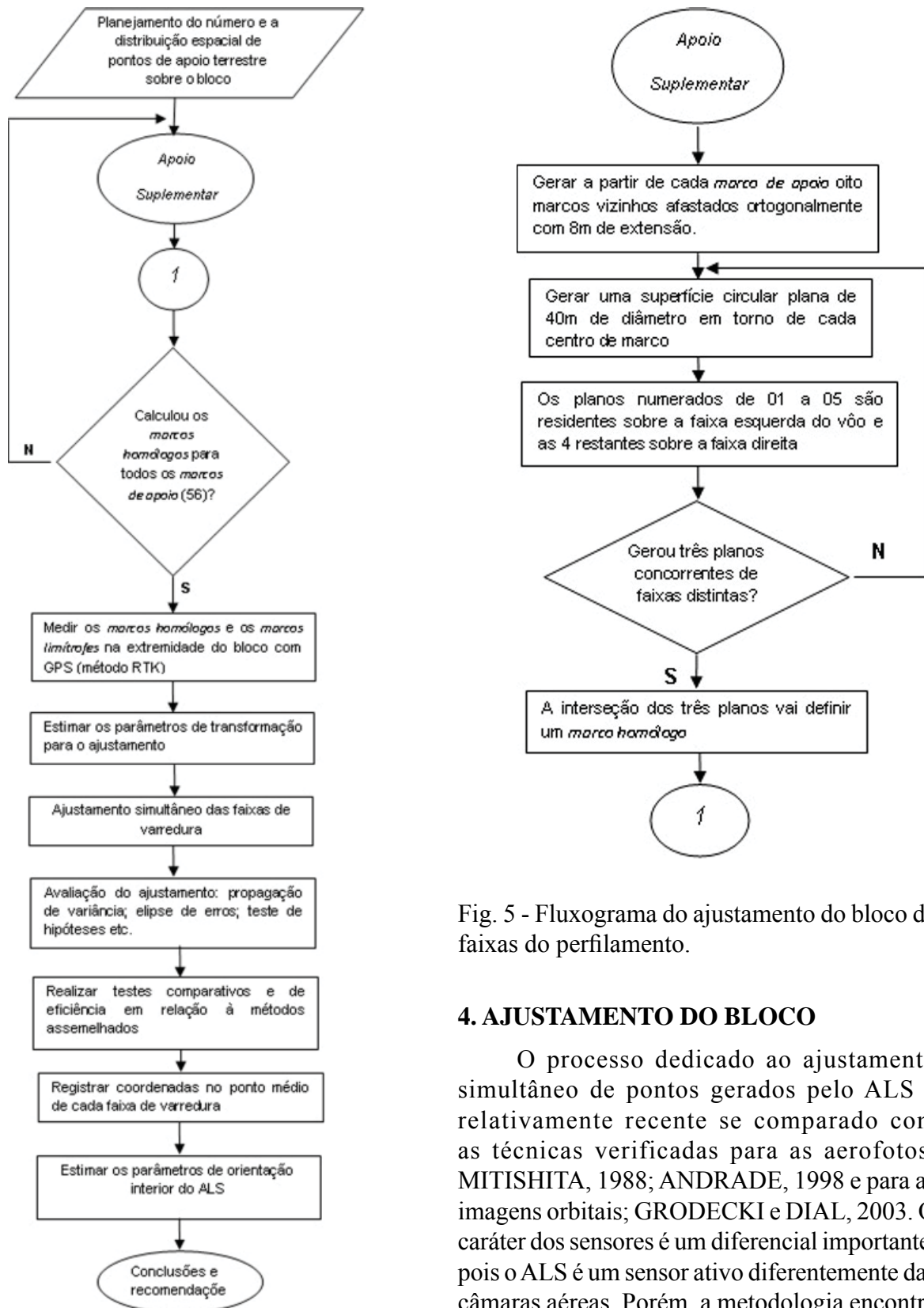


Fig. 5 - Fluxograma do ajustamento do bloco de faixas do perfilamento.

#### 4. AJUSTAMENTO DO BLOCO

O processo dedicado ao ajustamento simultâneo de pontos gerados pelo ALS é relativamente recente se comparado com as técnicas verificadas para as aerofotos; MITISHITA, 1988; ANDRADE, 1998 e para as imagens orbitais; GRODECKI e DIAL, 2003. O caráter dos sensores é um diferencial importante, pois o ALS é um sensor ativo diferentemente das câmaras aéreas. Porém, a metodologia encontra similaridades no tratamento das observações e no princípio adotado para os sensores passivos (imagens aéreas e orbitais).

Os procedimentos iniciam com a filtragem dos pontos, com especial atenção àqueles que recaem sobre a superfície do terreno. Faz-se um planejamento do arranjo espacial de pontos de caráter altimétrico e planimétrico posicionados estrategicamente no bloco, a seguir as observações são submetidas à rotina que indicam os pontos de passagem localizados na zona de sobreposição lateral entre as faixas. Daí, as medições são apoiadas por registros medidos com receptores GPS e, ao fim são determinados os parâmetros do modelo de ajustamento testado.

#### 4.1 Os marcos-estação

Os *marcos-estação* são aqueles pontos de coordenadas medidas antecipadamente ao restante dos marcos que atenderão ao apoio de campo. O objetivo é servir de base de um receptor GPS para a transmissão por rádio-comunicação das coordenadas corrigidas para outro receptor. Porque os locais elencados para a ocupação das Estações GPS prescindem de coordenadas conhecidas.

A disposição espacial dos marcos-estação atende a limitação de transmissão das correções diferenciais por rádio-comunicação entre os receptores GPS se levado em conta o quadro severo de verticalidade nos grandes centros urbanos do país. A especificação técnica do fabricante do equipamento (Receptor Leica série GPS 1200 de dupla frequência) sustenta que deve ser mantida a distância máxima entre o receptor-base e o receptor-estação de cinco quilômetros de extensão. A transmissão corresponde à área de abrangência de cada marco-estação, que ocupa o centro de cada círculo. Os levantamentos de todos os marcos-estação podem ser realizados com receptor de uma frequência com intervalo de rastreamento de uma hora de duração.

#### 4.2 Arquitetura do bloco

O módulo TERRASCAN é uma rotina que usa a plataforma do MICROSTATION V8. É uma opção vantajosa do CAD para realizar a filtragem dos pontos medidos pelo ALS que recaem sobre a superfície física. A capacidade de classificar com cores distintas cada faixa do perfilamento é outro aspecto positivo do algoritmo.

Os marcos usados, a ilustração na Fig. 6, na metodologia se dividem em seis grupos;

- ✓ formado por *marcos limítrofes* que ocupam as zonas fronteiriças do bloco;
- ✓ há os *marcos de apoio*, para o planejamento pois dão sustentação geográfica para a determinação dos *marcos parciais homólogos*;
- ✓ os *marcos homólogos* (recebem a denominação de *tie points* na relação de marcos medidos) propriamente, obtidos da interseção dos planos de igual nome nas zonas de sobreposição lateral e;
- ✓ finalmente, os *marcos de teste*, avaliam o comportamento do conjunto da coleção de pontos após o processo de ajustamento.

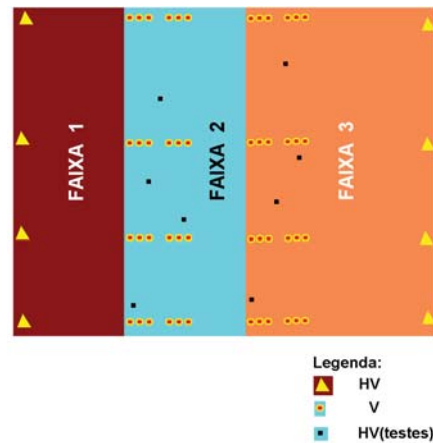


Fig. 6 - Faixas do perfilamento e os pontos de apoio alinhados

Os alinhamentos devem ser posicionados no sentido transversal à linha de voo. Os *marcos-limítrofes* são pontos de duplo apoio localizados nas bordas das faixas 1 e 3 e, portanto, coincidentes com as extremidades dos alinhamentos, as posições impõem ao ajustamento rigidez nas bordas.

O bloco de três faixas formado pela varredura do sensor embarcado mede, entre outros, pontos notáveis (interseção de cruzamentos na malha viária, divisão de lotes etc.). Local desejável para a disposição dos *marcos de apoio*. Embora não estejam diretamente relacionados ao processo de ajustamento, constituem o arcabouço de todos os marcos, diretamente relacionado ao sucesso da metodologia. Os pontos que definem a localização dos marcos, bidimensionais, portanto, são responsáveis pela materialização dos planos homólogos que residem nas faces de cada faixa que delimitam as zonas de sobreposição lateral e, são posicionados nas proximidades dos alinhamentos traçados

sobre o bloco.

Os *marcos parciais homólogos* de apoio são aqueles pontos residentes sobre as zonas de sobreposição lateral (ZSL) previamente assinalados entre as faixas e tem o propósito de registrar a localização do centro dos nove planos homólogos que são gerados. As coordenadas dos marcos são obtidas da varredura criada pelo ALS ora sobre a faixa esquerda ora sobre a faixa direita. O principal critério que norteia a seleção da faixa sobre o qual o marco será calculado é a proximidade com o centro de cada faixa. É uma alternativa, segundo MARTINS et al., 2006, para minimizar a contaminação de distorções sobre medições existentes nas bordas.

A rotina dedicada ao ajustamento das observações criadas pelo perfilamento é conduzida no ambiente computacional do MATLAB versão 7.04 e sustenta a decisão de organizar a *programação estruturada*. Pois, contrapõe a *programação linear* em dois aspectos cruciais;

- ✓ todos os programas podem ser reduzidos a apenas três estruturas: seqüência, decisão e iteração e
- ✓ a capacidade de usar as sub-rotinas e as funções na criação de estruturas simples em seus programas.

Dentre as diversas rotinas modulares usadas no ajustamento a determinação do marco parcial homólogo pode ocorrer com o uso do algoritmo do *vizinho mais próximo*.

Segundo BOTELHO et al., 2004, o algoritmo aplicado assegura que o valor interpolado seja um dos valores originais da varredura com o ALS, ou seja, não gera novos valores.

A obtenção das coordenadas planialtimétricas devido aos *marcos parciais homólogos* de apoio são estimadas em razão da submissão dos *marcos de apoio* à rotina computacional do vizinho mais próximo.

#### 4.2.1 Determinação dos planos homólogos sobre a superfície física

O princípio dos planos homólogos, mostrado na Figura 7, é de simples compreensão. Em função da limitação física e operacional de associar pontos homólogos nas faixas de sobreposição lateral na nuvem de pontos criada pelo ALS, foi proposta uma metodologia para o ajustamento. Consiste na adoção da

entidade geométrica formada por infinitas retas e infinitos pontos - a superfície plana, i.é, um plano homólogo que seja comum a duas faixas contínuas de varredura. Em última análise, realiza função assemelhada aos pontos de ligação (pontos de passagem) de faixas tradicionalmente adotados nas atividades de aerotriangulação. (KAGER, 2003; KAGER, 2004; KAGER, 2006, LEE et al., 2007 e RIES et al, 2002, HABIB et al, 2008) .

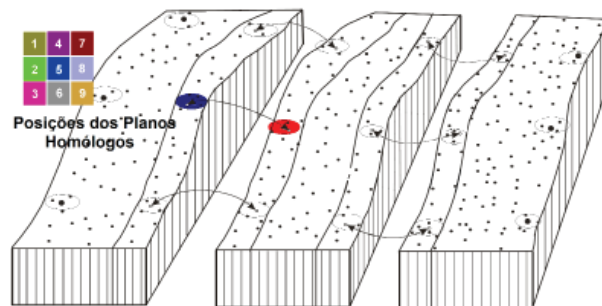


Fig. 7 - Perfilamento e as faixas homólogas

O registro das coordenadas atribuídas aos marcos parciais homólogos é o centro de uma figura circular com vinte metros de raio e reúne todos os pontos medidos (iluminados) pelo ALS. Após o qual é sorteado aleatoriamente três pontos não colineares que possam subsidiar os parâmetros necessários à geração de uma equação geral do plano. A localização dos planos homólogos é estabelecida segundo o sentido dos eixos cartesianos e também na diagonal compreendendo nove posições possíveis, inclusive a central, Equação (1).

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \\ a_3x + b_3y + c_3z + d_3 = 0 \\ a_4x + b_4y + c_4z + d_4 = 0 \\ a_5x + b_5y + c_5z + d_5 = 0 \\ a_6x + b_6y + c_6z + d_6 = 0 \\ a_7x + b_7y + c_7z + d_7 = 0 \\ a_8x + b_8y + c_8z + d_8 = 0 \\ a_9x + b_9y + c_9z + d_9 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

A utilização da equação do plano na forma mostrada aponta para uma solução com três observações necessárias e suficientes. A equação geral do plano é determinada por três pontos não





### 4.3 Observações de campo

As medidas voltadas para a determinação dos marcos - estação, marcos limítrofes nas bordas do bloco, marcos testes e os marcos parciais nas ZSL prescindem dos receptores GPS as observações de campo. As medições são os insumos necessários e suficientes para suprir as equações adotadas para o ajustamento. Os marcos – estação cumprem função no levantamento topográfico – a transmissão das correções diferenciais. As atividades dedicadas à locação de pontos foram realizadas com o par de receptores GPS, acompanhados de rádio – transmissão.

O monitoramento da constelação artificial GPS é contínuo, o sistema operacional responsável pela recepção do sinal dos satélites calcula e exibe nas telas dos equipamentos novas posições com ambigüidades resolvidas e completamente independentes. As posições tornam-se disponíveis com precisão centimétrica e com uma taxa de atualização de até 10 Hz, segundo especificação técnica do fabricante.

A coordenada posicional é inserida no gestor de dados do equipamento e se torna referência de todo o processo de locação dos levantamentos realizados ao alcance do marco-estação. O método cinemático RTK favorece a transmissão continuamente e abrevia o procedimento conhecido como pós-processamento dos dados rastreados. A operação com o segundo receptor GPS consiste na localização das coordenadas analíticas, estimadas pela rotina praticada na plataforma computacional MATLAB® v.7.14. Em um levantamento Tempo Real, o GPS remoto recebe os dados transmitidos pela referência e os combina com os seus próprios dados para calcular as coordenadas continuamente.

A escolha dos referenciais topográficos ou geodésicos adotados para materializar os pontos na superfície física é imprescindível para atender as demandas que atendem ao restabelecimento legítimo da geometria projetiva. Embora na prática, as superfícies referenciais sejam híbridas, pois adotam dois sistemas; posicional (para coordenadas planas ou geográficas) e altimétrico. Para reduzir as medidas sobre a superfície física, as transformações de referenciais devem ser tridimensionais cartesianas, a exemplo o referencial praticado para o funcionamento operacional do ALS.

### 4.4 Modelos de transformação de referenciais para o ajustamento das observações

As observações apuradas no levantamento topográfico e as medidas atribuídas aos marcos homólogos e marcos limítrofes são os principais elementos integrantes do processo de ajustamento. O procedimento dá seguimento à estimativa de doze parâmetros ao adotar o modelo isogonal, na equação (5).

#### 4.4.1 Transformação isogonal ou conforme de Helmert

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \lambda M \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$x', y', z'$

$a_{11}, \dots, a_{nn}, X_0, Y_0$   
e  $Z_0$

$X, Y, Z$

coordenadas de pontos no referencial terrestre local – espaço-objeto

parâmetros (12) de transformação do sistema no referencial do ALS para o sistema no referencial geodésico local

coordenadas para o referencial de pontos iluminados – espaço-LIDAR

A transformação isogonal executa três fatores de escala, três rotações, três translações e três fatores de não ortogonalidade entre os eixos (doze parâmetros). É também conhecida como transformação conforme de Helmert ou de similaridade. Aplicada a um cubo com face de lado L1 cria, outra posição do plano, um cubo com face de lado L2 que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. É uma transformação adequada para avaliações de qualidade geométrica de dados vetoriais e matriciais. Os pontos homólogos de passagem – comuns entre o referencial dos pontos iluminados e o referencial terrestre medido, permitem estimar os parâmetros de transformação entre os

referenciais e ponderar sobre o comportamento estatístico das observações. Além disso, cabem as técnicas de ajustamento paramétrico a solução do sistema de equações, pois os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados. LICHTI et al., 2000 praticaram um modelo assemelhado para avaliar o comportamento das coordenadas tridimensionais geradas por um emissor laser em plataforma terrestre.

#### 4.5 Modelo matemático de ajustamento

Considerando-se como observações as medidas geradas pelo ALS, pode-se matematicamente impor a seguinte condição:

$$La = F(Xa) \tag{6}$$

qual seja, as observações ajustadas podem ser expressas como uma função explícita dos parâmetros ajustados. Após a linearização de Taylor, resulta no seguinte modelo:

$$V = AX + L \tag{7}$$

Conhecido como modelo linearizado do método paramétrico, tem em conjunto as seguintes fórmulas para o cálculo dos parâmetros:

$$X = -(A^T PA)^{-1} A^T PL \tag{8}$$

$$Xa = Xo + X \tag{9}$$

$$Lo = F(Xo) \tag{10}$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial Xa} \right|_{Xo} \tag{11}$$

$$N = A^T PA \tag{12}$$

$$U = A^T PL \tag{13}$$

$$X = -(N)^{-1} U \tag{14}$$

$$Xa = X + Xo \tag{15}$$

$$L = Lo - Lb \tag{16}$$

$$La = Lb + V \tag{17}$$

#### Ajustamento paramétrico com injunção de posição – La=F(Xa)

A	matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros
Xo	valores aproximados dos parâmetros
Lb	valores observados
Xa	valores observados e ajustados dos parâmetros
X	correções aos parâmetros aproximados
V	vetor dos resíduos
U	vetor dos parâmetros
La	valores observados e ajustados dos parâmetros
Lo	função dos valores aproximados dos parâmetros
P	matriz peso das observações instrumentais com precisões iguais e não correlacionadas
N	matriz dos coeficientes das equações normais

Após o ajustamento que determina os valores mais prováveis dos parâmetros será necessário avaliar a precisão dos valores ajustados pela interpretação da matriz de variância-covariância.

#### Ajustamento paramétrico com injunção de posição – La=F(xa)

$\hat{\sigma}_0^2$	variância da observação de peso unitário a posteriori
n-u	graus de liberdade (diferença entre número de observações e o correspondente de parâmetros).
$\Sigma Xa$	Matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados – equação 20

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T PV}{n - u} \tag{18}$$

$$\Sigma Xa = \hat{\sigma}_0^2 (A^T PA)^{-1} \tag{19}$$

Como se trata de modelo matemático não linear em que os valores aproximados Xo e Lb são aproximações para os valores ajustados Xa e La, pratica-se a linearização pela fórmula de Taylor com o cuidado de desprezar os termos de ordem igual e superior à segunda. O modelo

aproximado necessita de iterações para se chegar aos valores mais prováveis das incógnitas.

Os elementos da matriz de coeficientes e do vetor independente de um sistema de equações lineares são aplicações inexatas. Esta falta de exatidão pode ser originada porque os dados são resultantes de experimentos ou computados com operações que carregam erros de arredondamento, ou mesmo do próprio armazenamento dos elementos em uma aritmética finita. A questão ocorre quando a perturbação introduzida em elementos do sistema pode alterar a resposta.

A última etapa dedicada ao ajustamento das observações que formam as faixas do perfilamento obtidas da navegação com o ALS é alcançada logo após a substituição dos parâmetros calculados na formulação dos modelos matemáticos praticados com o isogonal de Helmert e polinômio do terceiro grau, respectivamente.

A distribuição de pontos de apoio para a aerotriangulação pode ser adotado no perfilamento realizado com a tecnologia ALS. Deve haver um ponto mínimo HV em cada canto do bloco. Os pontos de apoio vertical (Vs) são distribuídos ao longo das linhas formadas pelos pontos HVs, perpendicularmente às linhas de vôo. Eles devem ser posicionados na superposição lateral entre modelos pertencentes a duas faixas.

TEMBA e PHILIPS, 2007, estudaram a propagação de variância no perfilamento com sensor laser. ANDRADE, 1998 afirma que a propagação de variância é mais severa no sentido transversal às faixas de recobrimento fotogramétrico do que ao longo das mesmas, particularmente, devido ao percentual de recobrimento. Trata-se, pois de um problema de rigidez geométrica.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

A primeira etapa destinada ao processo de ajustamento das observações da superfície amostrada é a estimativa dos parâmetros de transformação do modelo isogonal. Avalia a aderência dos marcos transformados pelo modelo matemático com os correspondentes medidos sobre a superfície física com o receptor GPS.

O procedimento prescinde de uma combinação de marcos de apoio simples e duplo

que, a um só tempo, atenda a rigidez geométrica do bloco e aos critérios de análise estatística. A busca de um arranjo espacial de marcos que propiciasse o melhor aproveitamento possível avaliou três abordagens distintas. São 34 e 30 observações sobre o bloco de faixas decorrentes do perfilamento para estimativa dos parâmetros de ajustamento. Os parâmetros ajustados são sintetizados no quadro 1.

Quadro 1: Parâmetros do ajustamento das observações

Parâmetros	Indicadores da precisão do ajustamento		
	$Xa_{36}$	$Xa_{34}$	$Xa_{30}$
a11	1,0E+000	1,0E+000	1,0E+000
a12	-1,8E-007	-1,9E-007	-2,1E-007
a13	6,2E-005	6,6E-005	6,7E-005
a21	-2,6E-05	-2,9E-005	-2,9E-005
a22	1,0E+000	1,0E+000	1,0E+000
a23	-1,7E-003	-1,8E-003	-1,9E-003
a31	-1,2E-004	-1,2E-004	-1,2E-004
a32	-1,2E-004	-1,2E-004	-1,2E-004
a33	1,0E+000	1,0E+000	9,9E-001
x0	1,5E-003	1,5E-003	1,4E-003
y0	-1,7E+000	-1,7E+000	-1,7E+000
z0	9,6E+002	9,6E+002	9,6E+002
Xa (m) - valores ajustados dos parâmetros			

É necessário detalhar o critério de correção de distorções que afeta a toda a extensão do bloco e, inclusive, àqueles calculados analiticamente à disposição de marcos que ocupam as zonas comuns a duas faixas. Porém, os recursos de validação finalizam nas respectivas localidades que foram aferidas com o receptor GPS.

As três faixas de cobertura aérea foram submetidas a vinte e cinco pontos de apoio distribuídos espacialmente de acordo com planejamento voltado para o ajustamento do bloco e dez pontos postos ao acaso com o propósito de avaliar a qualidade do processo de ajustamento, acompanhe no quadro 2 e quadro 3. Embora as locações e levantamentos tenham sido inferiores ao número de medições previstas no planejamento, não comprometeu a quantidade de observações de campo que prejudicassem o processo de ajustamento. O operador de campo com o receptor GPS enfrentou dificuldades de

ocupação que foram previstos na análise de riscos para as atividades de campo.

Quadro 2: Síntese das medições realizadas com receptor GPS na zona do projeto – marcos residentes nas bordas das faixas e marcos homólogos

Calculadas(m)			
Ponto	x(m)	y(m)	z(ortom)
tie_point_10104	672482,806	7186690,739	914,182
tie_point_10106	673260,309	7184682,072	924,428
tie_point_10110	672434,840	7188287,400	927,989
tie_point_10210	672961,476	7188313,676	915,231
tie_point_10214E	674575,910	7184657,000	896,422
tie_point_10216	675074,080	7183086,700	915,858
tie_point_10218E	673379,220	7188322,500	911,134
tie_point_10222	674936,310	7184659,800	890,843
tie_point_10224E	675637,810	7183081,900	885,583
tie_point_10101	670818,009	7188263,138	911,293
tie_point_10103	671414,595	7186682,811	931,744
tie_point_10105	672335,777	7184642,004	927,865
tie_point_10107	673053,051	7183116,075	904,146
tie_point_10309	674471,575	7188325,932	919,703
tie_point_10311	675195,227	7186751,335	911,056
tie_point_10313	676029,381	7184571,735	894,676
tie_point_10315	676764,012	7183058,109	920,410
Campo(m)			
Ponto	x(m)	y(m)	z(ortom)
tie_point_10104	672482,819	7186690,690	914,506
tie_point_10106	673260,244	7184682,042	924,651
tie_point_10110	672437,660	7188312,312	925,658
tie_point_10210	672961,464	7188313,700	915,955
tie_point_10214E	674575,799	7184657,556	893,357
tie_point_10216	675074,019	7183086,679	914,763
tie_point_10218E	673379,204	7188322,596	910,954
tie_point_10222	674936,298	7184659,765	890,847
tie_point_10224E	675637,797	7183081,903	885,275
tie_point_10101	670817,988	7188263,454	911,853
tie_point_10103	671414,595	7186682,811	931,753
tie_point_10105	672335,777	7184642,004	927,903
tie_point_10107	673053,068	7183116,087	904,241
tie_point_10309	674471,567	7188325,921	919,682
tie_point_10311	675195,247	7186751,355	911,034
tie_point_10313	676029,381	7184571,735	894,676
tie_point_10315	676764,012	7183058,110	920,409

Quadro 3: Síntese das medições realizadas com receptor GPS na zona do projeto – marcos testes e marcos homólogos

Calculadas(m)			
Ponto	x(m)	y(m)	z(ortom)
tie_point_10102W	671622,040	7188274,700	961,752
tie_point_10108W	673825,830	7183102,300	912,465
tie_point_10112W	672771,842	7186711,465	916,104
tie_point_10114W	673827,905	7184677,676	911,582
tie_point_10116W	674479,247	7183091,044	916,682
tie_point_10212W	673399,050	7186726,300	934,867
tie_point_10214W	674292,062	7184665,126	897,124
tie_point_10220W	673847,765	7186731,487	911,176
TESTE01	675408,693	7183590,864	895,139
TESTE02	674583,323	7185182,105	898,663
TESTE03	674193,554	7184176,644	904,470
TESTE04	673540,999	7184970,798	922,335
TESTE05	674073,940	7183507,683	918,388
TESTE06	672222,450	7187722,970	950,751
TESTE07	673066,797	7187744,515	932,371
TESTE08	672651,329	7186335,467	911,763
TESTE09	673542,143	7186408,474	910,375
TESTE10	673575,766	7187421,045	930,076
Campo(m)			
Ponto	x(m)	y(m)	z(ortom)
tie_point_10102W	671621,952	7188274,840	962,093
tie_point_10108W	673825,835	7183102,286	912,817
tie_point_10112W	672771,876	7186711,491	915,544
tie_point_10114W	673827,845	7184677,618	908,355
tie_point_10116W	674479,162	7183091,033	916,819
tie_point_10212W	673399,100	7186726,253	934,524
tie_point_10214W	674292,028	7184665,148	897,531
tie_point_10220W	673858,291	7186731,475	910,628
TESTE01	675408,608	7183590,727	894,974
TESTE02	674583,331	7185182,108	898,667
TESTE03	674193,581	7184176,652	904,474
TESTE04	673540,991	7184970,814	922,340
TESTE05	674073,938	7183507,682	918,364
TESTE06	672222,439	7187722,921	950,769
TESTE07	673066,825	7187744,549	931,980
TESTE08	672651,327	7186335,489	911,768
TESTE09	673542,096	7186408,452	910,371
TESTE10	673575,772	7187421,045	930,071

Uma avaliação do desempenho do modelo matemático dedicado a corrigir discrepâncias



residentes na zona de sobreposição lateral exige um pouco mais de atenção. Além disso, foi estabelecida uma premissa - em todas as fases contaram com uma referência de aferição, no caso, as medições de campo realizadas com receptor GPS.

Não é sabido o local exato da ocorrência de discrepância vertical ao observar a imagem de intensidade, tão logo na extensa listagem do terno de coordenadas cartesianas. O critério estabelecido para avaliar o desempenho do modelo isogonal sem a necessidade de contar com uma referência de aferição foi estabelecer uma nova premissa;

1) a discrepância é uma característica que se manifesta nas zonas de sobreposição lateral. É causada por falhas operacionais do sensor e se torna mais severa nas bordas das faixas

2) a distorção horizontal nas bordas da faixa atinge 0,20 m de extensão.

A premissa pressupõe que uma observação medida com o sensor ALS sobre a superfície amostrada na borda de uma faixa pertence ao círculo de incerteza de dez centímetros de raio. É importante salientar que LOHMANN e KOCH, 1999 compartilham dos mesmos pressupostos.

Como o pressuposto atinge todas as faixas da cobertura aérea foi criada uma condição apropriada para a avaliação das observações contidas nas ZSL. Os comandos do MATLAB® v. 7.0.4 selecionam todas as observações de uma faixa que guardem vinte centímetros ou menor distância, quando comparados com as coordenadas de observações pertencentes à faixa adjacente. Ao fim do processo, a diferença entre as coordenadas verticais são calculadas e definidas como discrepância vertical.

O modelo isogonal no espaço é submetido à avaliação. Nesta etapa, as coordenadas de observações que repousam sobre a faixa 1 são transformadas segundo os parâmetros internos do modelo isogonal. A seguir, novamente a operação matemática que calculou a discrepância é repetida. O modelo de transformação será aprovado se as coordenadas verticais transformadas tornar as diferenças verticais ou discrepâncias reduzidas ou nulas.

As duas faixas de varredura um e dois foram submetidas ao processamento e a rotina

de busca localizou setenta e nove pontos de observação. A Figura 8 mostra a discrepância vertical existente e a Figura 9 revela as mudanças que a discrepância vertical sofreu.

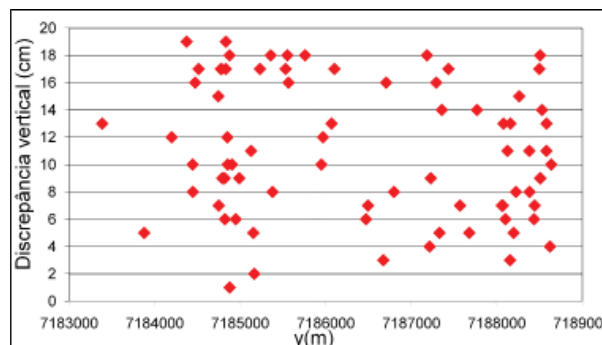


Fig.8 - Variação da discrepância vertical antes de ser submetida ao modelo isogonal de transformação.

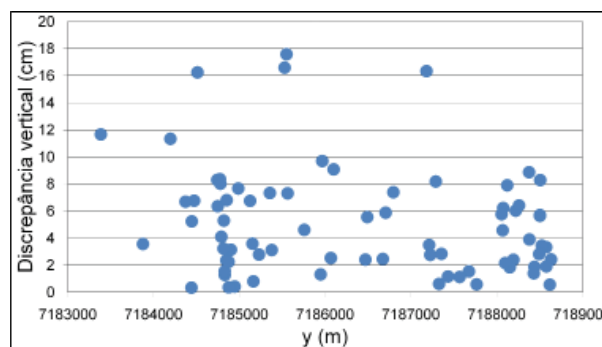


Fig.9 - Variação da discrepância vertical após ser submetida ao modelo isogonal de transformação.

Outro aspecto que merece destaque, ao avaliar a influência da distribuição alinhada dos marcos para a redução de resíduos, em particular, as discrepâncias verticais ocorre ao observar o histograma das reduções que foram efetivadas, conforme Figura 10. As reduções mais acentuadas no histograma apontam para as coordenadas 7188497 e 7187569 m ao norte do bloco sob a influência do alinhamento dos marcos limítrofes 10101 e 10309 e a coordenada 7184831 m ao sul sob a influência do alinhamento dos marcos 10105 e 10313.

A equação (20) está completa com os parâmetros, ao lado esquerdo a coluna reserva um lugar para as coordenadas transformadas, ao outro lado as coordenadas originais. Logo, segundo todas as avaliações, arranjos e cálculos realizados é a melhor alternativa para o propósito da pesquisa, naturalmente, restrita à área do projeto.

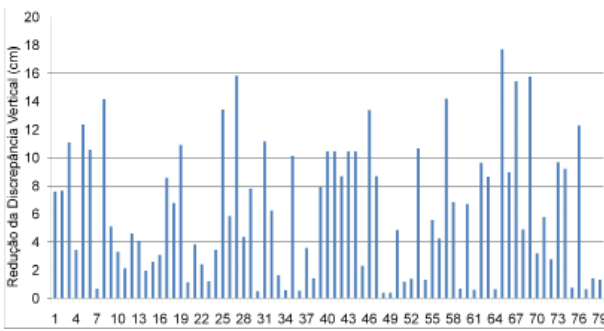


Fig. 10 - Redução da discrepância vertical.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}^{Esp. \_ objeto} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}^{Esp. \_ scanner} + B$$

$$A = \begin{vmatrix} 9,9E - 001 & 3,7E - 008 & -9,3E - 005 \\ 1,7E - 007 & 1,000 & -6,7E - 005 \\ -9,4E - 005 & -1,25E - 004 & 1,001 \end{vmatrix}$$

$$B = \begin{vmatrix} 1,7E - 003 \\ -1,731 \\ 9,6E + 002 \end{vmatrix}$$

## 6. DISCUSSÃO

A rotina - proprietário que abriga os parâmetros internos de realização de medições, a interpolação e sincronização dos sinais emitidos pelos componentes internos e toda a sorte de mecanismos de controle são, até o momento, desconhecidos. As tentativas de estimar os algoritmos que norteiam as engrenagens do ALS esbarram no volume denso e formato dos arquivos digitais submetidos às restrições de veiculação dos fabricantes. Diante deste quadro, a pesquisa indicou um caminho que pode aproximar as soluções de problemas enfrentados até então, pois pauta os modelos matemáticos por um procedimento assemelhado à aerotriangulação.

Foram experimentados os modelos matemáticos assinaladas por BURMAN (2000) e a equação geral do ALS defendida LOHMANN & KOCH (1999) para o funcionamento do sensor ALS. Inicialmente foi submetido à nuvem de pontos iluminados do sensor, um filtro para selecionar apenas os locais que estavam no centro de cada uma das três faixas de perfilamento. Em

seguida, os parâmetros de ajustamento com os modelos sugeridos.

De certo, houve omissão nos respectivos artigos sobre o repertório de componentes que compreendem os erros sistemáticos. BURMAN (2002) (21) elenca dois componentes. Em primeiro lugar, os modelos de correção dos erros sistemáticos devido ao receptor GPS o método RTK que realiza um filtro de resíduos, sobre as coordenadas transmitidas para a aeronave durante o perfilamento. Em segundo lugar, embora tenha inserido a matriz de rotação devido à falta de interpolação entre o IMU e o emissor/receptor laser, não ocorreu a mesma intenção em relação ao erro de sincronização entre os dois componentes do sensor, citado por SCHENK (2001). Logo, se não definidos claramente a dimensão destes elementos no processo de ajustamento haverá divergência entre as coordenadas, objeto do ajustamento, e das coordenadas obtidas com o receptor GPS.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + R_{IMU} R_{IMU}^{laser} R_{laser} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix} \quad (21)$$

onde:

- 1 distância compreendida entre a plataforma de suporte do ALS e a superfície iluminada
- $\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$  coordenadas terrestres do ponto iluminado
- $\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$  coordenadas terrestres de origem do referencial local
- $R_{IMU}$  matriz de rotação da IMU
- $R_{IMU}^{laser}$  matriz de rotação devido a erro de interpolação entre o IMU e o emissor laser(\*)
- $R_{laser}$  matriz de rotação do emissor laser

(\*) erro de interpolação é causado pela divergência entre a frequência de pulsos emitidos pelo ALS e a frequência do sinal produzido pelo receptor GPS.

Por outro lado, LOHMANN (2000) sustenta que um modelo matemático intitulado *equação geral do ALS* (22) responde matematicamente pelos resultados obtidos com o perfilamento do sensor laser.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}_{ALS} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}_{GPS} + R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_L - t_{IMU} - t_{GPS} \quad (22)$$

$$R = R_{GPS} \cdot R_i \cdot R_{IMU} \cdot R_{IMU/ALS} \cdot R_L$$

$x', y', z'$	coordenadas finais do ALS
$x_0, y_0, z_0$	coordenadas do GPS
$R_{GPS}$	matriz de rotação devido ao atitude da antena do receptor GPS
$R_i$	matriz de rotação devido ao desvio da vertical
$R_{IMU}$	matriz de rotação devido ao atitude da unidade de medição inercial
$R_{IMU/ALS}$	matriz de rotação devido ao atitude combinado da unidade de medição inercial e o emissor/receptor laser
$R_L$	matriz de rotação devido ao atitude do emissor/receptor laser
$z$	coordenada vertical parcial do ALS
$x=y=0$	coordenadas posicionais parciais do ALS

Além de parâmetros como o referencial local sobre a superfície física e matrizes de rotação dos componentes internos do sensor laser, agregaram-se outros. São a variação das componentes do desvio da vertical, a matriz de rotação do receptor GPS, a matriz de rotação da IMU e de rotação do emissor/receptor laser para citar alguns exemplos.

A proposta elencada por LOHMANN (2000) sofre da mesma característica percebida com o uso do polinômio do terceiro grau ou de ordem superior. Falta certeza da eficiência dos parâmetros, em número excessivo, para modelar o comportamento do registro produzido pelo sensor laser. Porém, o Autor fez testes com os

modelos sugeridos e não obteve os resultados que se aproximassem das coordenadas esperadas.

## 7. CONCLUSÕES

O artigo trouxe elementos que permitem a compreensão do funcionamento do sensor Laser Scanner Aerotransportado e as respectivas propriedades. Revelou, ainda, dentre as fragilidades do perfilamento realizado pelo equipamento a discrepância vertical. Fenômeno percebido principalmente nas bordas das faixas de aerolevantamento que degradam o componente da coordenada vertical. A pesquisa detalha uma metodologia que vale de princípios praticados na fotogrametria voltados para o ajustamento simultâneo do bloco conhecido por aerotriangulação. A metodologia adotada após a eleição de pontos processados sobre o bloco realiza medidas com receptores GPS. O resultado permite estimar parâmetros matemáticos que modelam o funcionamento do sensor laser e corrigem discrepâncias fundamentalmente vertical.

Logo, é possível afirmar que a técnica praticada sobre um volume de medições, determina a posição mais correta sob o ponto de vista da influência de imprecisões que possam contaminar a medição original. Para tal, fez-se uma diversidade de combinações e arranjos em busca de uma estimativa mais acertada. Cabe destacar outro aspecto, o termo ajustamento deve atentar para a praticidade e eficiência do modelo para calcular o posicionamento dos marcos ou medições envolvidas. A pesquisa procura mediar uma situação que os parâmetros estimados para o modelo de transformação matemática alcance as nuances e variâncias do relevo em todo o bloco. Quer dizer, a afinidade do parâmetro do modelo não poderá se limitar em atingir um índice ótimo de adequação probabilístico para um número definido de observações, mas atender ao bloco, ainda que os resíduos possam trazer mais incertezas do que um elenco de parâmetros alternativos de maior precisão. Isto se deve ao fato da precisão alcançada para determinadas combinações ser rígida, pois as flutuações enfrentadas em outras localidades do bloco extrapolam a capacidade do modelo adequar

as observações e, conseqüentemente, produz resultados insatisfatórios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-BAYARI, O. A.; AL-HANBALI, N.; BARBARELLA, M.; NASHWAN, A. **Quality assessment of DTM and orthophoto generated by airborne laser scanning system using automated digital photogrammetry**. Disponível em < <http://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/part3/papers/paper097.pdf>>. Acesso: 05 outubro 2013.

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

BOTELHO, M. F.; CENTENO, J. A. S. **Identificação de edificações presentes em imagem de alta resolução utilizando redes neurais e dados do laser scanner**. I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - SIMGEO, Recife, v. 1, p. 1-9, 2004.

BRETAR, F.; PIERROT-DESEILLIGNY, M.; ROUX, M. **Estimating intrinsic accuracy of airborne laser data with local 3D-offsets**. Disponível em < [http://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/3-w13/papers/bretar\\_alsdd2003.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/3-w13/papers/bretar_alsdd2003.pdf)>. Acesso: 05 outubro 2013.

BURMAN, H. **Laser strip adjustment for data calibration and verification. International archives of photogrammetry and remote sensing**, Austria, v. 34, part. I3., p. 67-72, 2002.

BURMAN, H. **Adjustment of laser scanner data for correction of orientation errors**. Disponível em < [http://www.isprs.org/proceedings/xxxiii/congress/part3/125\\_XXXIII-part3.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxiii/congress/part3/125_XXXIII-part3.pdf)>. Acesso: 05 outubro 2013.

CROMBAGHS, M. J. E.; BRÜGELMANN, R.; Min, e. J. **On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data**. Disponível em < [http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part3/230\\_XXXIII-part3.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part3/230_XXXIII-part3.pdf)>. Acesso: 05 outubro 2013.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. UFPR, Curitiba, 3ª edição, 2004. 97p.

DALMOLIN, Q., SANTOS, D. R., SANTOS

Jr. R. L. & BÄHR, I. H. **O uso de feições retas extraídas do MDT gerado pelo sistema de varredura laser como apoio para o cálculo da resseção espacial de imagens digitais**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 11, n. 1, p.117-140, 2005.

GRODECKI J.; DIAL, G. **Error propagation in block adjustment of high-resolution satellite images**. Disponível em < [http://spaceimaging.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2003/C\\_GrodeckiJacek\\_GeneDial\\_JamesLutes\\_2003.pdf](http://spaceimaging.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2003/C_GrodeckiJacek_GeneDial_JamesLutes_2003.pdf)>. Acesso: 05 outubro 2013.

HABIB, A.; KERSTING, A. P.; RUIFANGA, Z.; AL-DURGHAM, M.; KIM, C.; LEE, D. C. **Lidar strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips**, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, Vol. XXXVII. Part B1.p. 385-390, 2008

HYYPÄ, J., **State of the Art in Laser Scanning**. Disponível em <<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/210Hyypa.pdf>>. Acesso: 25 abril 2012.

KAGER, H. **The importance of exact georeferencing of airborne lidar data**. Gis@ development Asia Pacific (invited), Natural Resource Management: Going critical, v. 10, issue 4; p.1 – 10, 2006.

KAGER, H. **Discrepancies between overlapping laser scanning strips - simultaneous fitting of aerial laser scanner strips**. Disponível em < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/99.pdf>>. Acesso: 05 outubro 2013.

KAGER, H. **Simultaneous georeferencing of aerial laser scanner strips**. Öst. Zeit-schrift für vermessung und geoinformation, v. 4, n. 91, p. 235 – 242, 2003.

KORNUS, W.; RUIZ, A. **Strip adjustment of lidar data**. XIXth ISPRS Congress: Commission III, WG III/3, German, v. 34, part. 3, p. 47–50, 2003.

KRAUS, K. **Principles of airborne laser scanning**, Disponível em < [https://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/kk\\_schweden\\_](https://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/kk_schweden_)



laserscanning.pdf>. Acesso: 05 outubro 2013.

LEE, J.; YU, K.; KIM, Y.; HABIB, A. **Adjustment of discrepancies between LIDAR data strips using linear features**, IEEE Geoscience and Remote Sensing. v. 4, No. 3, p. 1545 – 1550, 2007

LICHTI, D. D.; STEWART, M. P.; TSAKIRI, M. SNOW, A. J. **Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system**. Geomatics Research Australasia, n.72, p. 1-23, 2000.

LOHMANN, P.; KOCH, A. **Quality assessment of laser-scanner-data**. Proceedings of ISPRS workshop “Sensors and mapping from space 1999”, v. 9, cd, 1999.

LOHMANN, P.; KOCH, A.; SCHAEFFER, M. **Approaches to the filtering of laser scanner data(a)**. Disponível em < [http://www.isprs.org/proceedings/xxxiii/congress/part3/540\\_XXXIII-part3.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxiii/congress/part3/540_XXXIII-part3.pdf)>. Acesso: 05 outubro 2013.

MITISHITA, E.; OLIVAS, M. **Calibração de câmaras aerofotogramétricas a partir de aerofotos digitalizadas**. Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 7, n. 1, p.64-76, 2001.

Newby, S.; P. Mrstik. **Lidar on the Level in Afghanistan**, GPS World, Vol. 16, No. 7, p. 16-22. 2005.

RIES, C.; KAGER, H.; STADLER, P. **High-quality geo-referencing of GPS/IMU-supported multi-spectral airborne scanner data – experiences and results**. Disponível em < <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part3/papers/paper066.pdf>>. Acesso: 05 outubro 2013.

SCHENK, T. Modeling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners. **Technical Notes in Photogrammetry**, n. 19, p. 1-46, 2001.

TEMBA, P.; PHILIPS, J. Análise da propagação de covariância na zona de sobreposição lateral de faixas de voo. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto **Anais XIII**, Florianópolis/SC, INPE, p. 3689-3691, 2007.

TORRES, J. M. C.; HEMERLY, E. M. **Caracterização de sensor inercial aplicação em barco autônomo**. VIII Encontro de iniciação científica e pós-graduação do ITA, São José dos Campos/SP, p. 157-163, 2002.