



Geração de ortofotos com abordagem do georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas

Generation of Ortofotos with a New Approach to Direct Georeferencing of Aerial Digital Images

*Marlo Antonio Ribeiro Martins*¹
*Edson Aparecido Mitishita*²

Recebido em novembro de 2017.
Aprovado em abril de 2018.

RESUMO

A nuvem de pontos tridimensional gerada por um Sistema de Laser Scanner Aerotransportado, conhecido como “*Light Detection And Ranging*” – LiDAR, associada a imagens digitais aéreas, tem sido usada para a geração de ortofotos com qualidade comparável aos métodos convencionais fotogramétricos. O ideal seria que esta associação fosse simultânea. Isto faria com que o tempo de execução das ortofotos diminuísse. Considerando o exposto, a pesquisa apresentada a seguir, realizou esta associação do LiDAR com uma Câmara Digital de Pequeno Formato, com o objetivo de gerar ortofotos utilizando uma nova abordagem para o georreferenciamento direto das imagens digitais aéreas. Esta integração ocorreu a partir do uso do “*Inertial Navigation System*” – INS do Laser Scanner Aerotransportado para orientar a câmara digital de maneira direta. Para isto foi necessário determinar o braço, conhecido também por “*level arms*”, e o giro, comumente designado como “*boresight angles*”, da câmara digital em relação ao INS. Com esta relação conhecida, foi realizado um voo a 1.000 m de altura com imagens digitais de 23 cm de resolução espacial para a realização de dois experimentos. O primeiro experimento consistiu na geração de ortofotos na escala 1/2.000 de maneira direta sem a utilização de pontos de apoio, já o segundo utilizou quatro pontos de apoio. Partindo destes estudos, constatou-se que o experimento sem os pontos de apoio não atingiu a precisão desejada, já o experimento que utilizou os pontos de apoio atingiu a precisão desejada.

PALAVRAS-CHAVES: Integração. LiDAR. Ortofotos Digital. *Level Arms*. *Boresight Angles*.

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Brasil.
E-mail: marlo_martins@hotmail.com

² Universidade Federal do Paraná – UFPR. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Brasil.
E-mail: mitishita@ufpr.br

ABSTRACT

The cloud points obtained by Airborne Laser Scanner, known as Light Detection and Ranging – LiDAR, associated with digital images generate orthophotos accurately. Ideally, this association was simultaneous, this would make the runtime of the orthophotos decreased. Considering the above, the research carried out this association the LiDAR with Digital Camera Small Format, with the goal of manufacturing orthophotos using a new approach of the direct georeferencing. This integration arose from Inertial Navigation System – INS of the Airborne Laser Scanner to guide the digital camera directly. It was necessary to determine the level arm and boresight angles of the digital camera in relation to the INS. This known relation, a flight was performed in height of 1.000 meters to obtain digital images with ground sample distance (GSD) of 23 cm to implement two experiments. Both experiments were performed to obtain orthophotos in scale 1/2.000 using the direct georeferencing. The first one has been done without using control points and the second one has been performed using four control points. The experiment without the control points not has reached the precision desired, but the experiment that used the control points has reached the precision desired.

KEYWORDS: Integration. LiDAR. Digital Orthophotos. Level Arms. Boresight Angles.

* * *

Introdução

A Fotogrametria ao longo dos tempos se desenvolveu de forma a obter informações da superfície da Terra com agilidade e precisão. Em paralelo a este desenvolvimento houve o surgimento de novos sistemas sensores aerotransportados, que possibilitam a aquisição de dados topográficos densos e precisos, como é o caso do Sistema Laser Scanner Aerotransportado, ou comumente conhecido como “*Light Detection And Ranging*” (LiDAR). Esta tecnologia tem se tornado instrumento auxiliar em todas as aplicações na Fotogrametria, em que se exigem modelos digitais de superfície – MDS mais refinados, como por exemplo, modelagem de áreas urbanas, reservatórios de usinas hidroelétricas e linhas de transmissão. Sobre estas modelagens e utilização de dados LiDAR, pode ser consultado em Poullis e You (2009); Lafarge et al. (2010); Nan et al. (2010); Venegas et al. (2012); Zhou e Neumann

(2012); e Lin et al. (2013). Além desta tecnologia para a obtenção do MDS, atualmente outros processos de obtenção destes modelos vêm sendo desenvolvidos, como por exemplo, o “Structure from Motion” – SfM que obtém o MDS a partir das imagens da câmara digital, mais informações sobre este processamento digital de imagens ver em Westoby et al. (2012).

A informação de altimetria dos objetos do LiDAR, unida à informação de imagens digitais aéreas de alta resolução espacial, geram ganhos significativos na extração e detecção das diferentes feições que compõem os projetos cartográficos. Esta união de informações, na maioria dos sistemas comerciais utilizados, é realizada com base em dados de distintos levantamentos aéreos, ou seja, é realizado um aerolevanteamento para a obtenção dos dados LiDAR e um outro aerolevanteamento para a aquisição das imagens digitais aéreas.

Desta maneira, para orientar as imagens digitais aéreas, é necessário realizar um georreferenciamento indireto, ou seja, partir de pontos de apoio em uma ressecção espacial, conhecida como Fototriangulação. Este método utiliza o modelo matemático das equações de colinearidade para o referenciamento das coordenadas dos pontos de apoio no espaço objeto e suas respectivas coordenadas no espaço imagem. Mais informações sobre o georreferenciamento indireto pode ser consultar em Lugnani (1987); Andrade (1999); Habib e Morgan (2003); Morgan e Habib (2005); Tommaselli e Reiss (2005); Machado (2006); Santos (2007); Mitishita et al. (2008); e Pierrot-Deseilligny e Clery (2011).

Já o georreferenciamento direto se baseia em duas tecnologias para o referenciamento das imagens, o “*Inertial Measurement Unit*” – IMU e o “*Global Navigation Satellite System*” – GNSS.

Partindo do princípio que todos os sistemas LiDAR possuem um IMU integrado a um GNSS e que a informação da orientação exterior ($X'_0, Y'_0, Z'_0, \omega', \varphi', \kappa'$) do sensor do LiDAR estão disponíveis, a presente pesquisa se utilizou destas informações não só para o processamento dos dados do LiDAR, mas

também para o processamento das imagens digitais aéreas, realizando assim um georreferenciamento direto das imagens. Outras abordagens desta utilização podem ser consultadas em Heipke et al. (2002); Martins (2010); e Mitishita et al. (2016).

Nesta pesquisa foi utilizada uma câmara digital de pequeno formato de fabricação da EASTMAM KODAK COMPANY (ver figura 01), com a seguinte especificação: modelo DCS Pro14n; lente AF Nikkor 35mm f/2D; sensor RGB CMOS Imager de 12 bits; dimensão do sensor de 36 x 24 mm; número de pixel efetivos de 4500 x 3000 pixel (13,5 MegaBytes); e dimensão do pixel de 8 μ m.

Figura 1 – Câmara Digital, modelo KODAK DCS Pro14n



Fonte: EASTMAM KODAK COMPANY (2010)

Desta maneira houve a necessidade de se realizar a calibração da câmara para obtenção dos Parâmetros de Orientação Interna – POI. Mais informação sobre calibração de câmaras digitais de pequeno formato, bem com a estabilidade dos sistemas óptico-sensores podem ser consultados em Santos (2000); Santos (2003); Machado et al. (2004); Gonçalves (2006); Fraser (2013); Akkaynak et al. (2014); e Gneeniss et al. (2015).

O georreferenciamento direto ou medição direta dos Parâmetros de Orientação Exterior – POE do sensor de imageamento para aplicações fotogramétricas está consolidado na combinação do GNSS com o IMU. O GNSS fornece as informações de posição do centro de projeção do sensor de

imageamento (X_0, Y_0, Z_0) no referencial geodésico, enquanto o IMU informa a atitude do sensor no espaço (ω, ϕ, κ). A união destes sensores foram o “*Inertial Navigation System*” – INS. A integração dos dois sistemas melhora significativamente a precisão e a confiabilidade de cada sistema individualmente. Assim, esta integração, a cada ano que passa, vem melhorando e trazendo ganhos significativos para os levantamentos apoiados por INS, conforme Škaloud et al. (1996); Cramer et al. (1999); Martins (2010); Zhang e Shen (2013)^a; Zhang e Shen (2013)^b; e Zhao et al. (2014).

Desta maneira o georreferenciamento direto das imagens foi utilizado para a produção de ortofotos na escala de 1/2.000. Logo, esta pesquisa é justificada pela redução dos custos para a obtenção de ortofotos, pois utiliza câmara digital de pequeno formato ou de baixo custo. Além da diminuição dos custos, outros ganhos com esta integração podem ser vistos como: a diminuição de pontos de apoio no terreno, a possibilidade de se gerar ortofotos em lugares inacessíveis, como por exemplo, em florestas, áreas litorâneas e ilhas, e pôr fim a rapidez na geração do produto, pois todo o processo é automatizado.

2 Material e Método

2.1 Material

Para a realização desta pesquisa foram empregados dois aerolevantamentos, sendo o primeiro uma cobertura aerofotogramétrica com resolução espacial de 23 cm para aquisição de 23 imagens da câmara digital junto com os dados do LiDAR, no município de Curitiba, ver figura 01. Com este primeiro voo foi determinado o giro (*Boresight Angles*) da câmara digital em relação ao INS do LiDAR. O braço (*Level Arms*) da câmara digital em relação ao INS foi determinado por métodos topográficos e será exemplificado mais adiante.

O segundo aerolevanteamento, 11 meses depois do primeiro voo, consistiu de uma cobertura igual à primeira, na mesma área (ver figura 02), para aquisição de 22 imagens da digital junto com os dados do LIDAR, para a produção de ortofotos na escala 1/2.000, utilizando a posição relativa da câmara digital determinado pelo primeiro voo, já que a câmara digital não foi retirada da aeronave.

Figura 2 – Área dos Aerolevanteamentos no município de Curitiba, com duas faixas de voo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

2.2 Método

Para realizar a integração da câmara digital na aeronave e no LIDAR, foi necessária a confecção de dois itens: caixa de fixação da câmara digital, na posição zenital (Z normal ao CMOS); e cabo de conexão com o INS do LiDAR para a obtenção dos Parâmetros de Orientação Exterior – POE da câmara digital, ver figura 3.

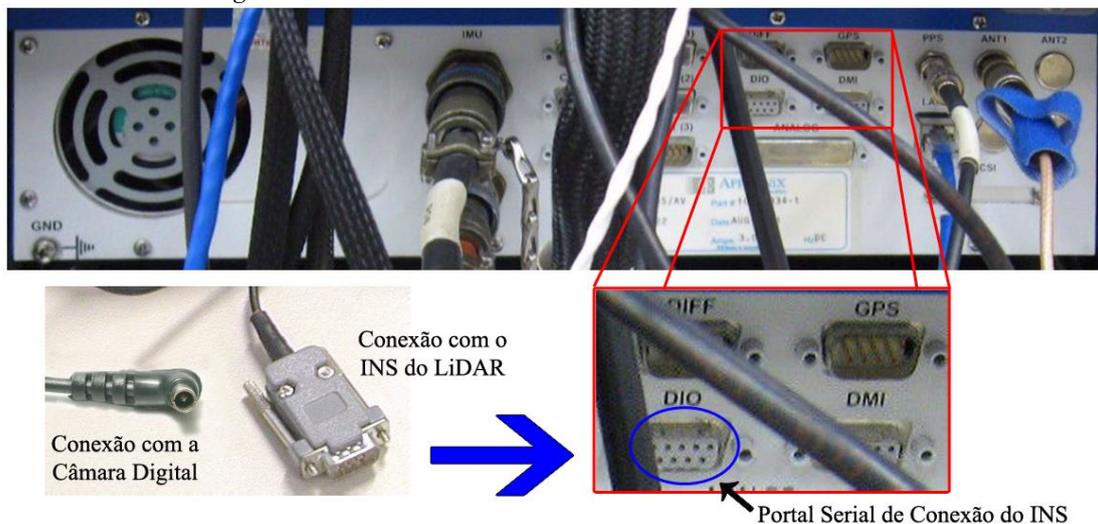
Figura 3 – Caixa de fixação com espuma de Poliuretano e cabos de conexão com o INS.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A caixa de fixação foi confeccionada em acrílico com dimensões de 18 cm x 22 cm x 10 cm (largura, comprimento e altura, respectivamente), com espuma de poliuretano expansível para minimizar as vibrações sofridas pela câmara digital durante a fase de voo. O cabo de conexão para a obtenção dos POE das imagens é feito através da porta RS-232, conhecida por porta serial, existente no INS do LiDAR, ver figura 04.

Figura 4 – Porta Serial de conexão com o INS do LiDAR.



Fonte: Elaborada pelos autores.

O processo de integração ocorre no momento da tomada de cada fotografia. Neste momento a câmara digital envia um pulso através do cabo ao INS do LiDAR. Este pulso, ou seja, o tempo do evento é registrado e armazenado. Este tempo é usado posteriormente para processar e calcular a informação do POE de cada fotografia.

A adaptação da câmara digital na aeronave foi feita de maneira que a mesma sofresse os mesmos efeitos das rotações (ω' , φ' , κ') do LiDAR e assim possibilitasse o uso do INS do LiDAR, ou seja, a câmara foi montada na mesma abertura do LiDAR, ver figura 05.

Figura 5 – Montagem da câmara junto ao Lidar.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para obtenção de resultados confiáveis no georreferenciamento indireto, e conseqüentemente na determinação dos POE da câmara digital, foi criado um campo de calibração no município de Curitiba, nas proximidades do Aeroporto do Bacacheri, com 47 alvos pré-sinalizados e levantados por GNSS pelo método estático rápido, no sistema de referência nacional SIRGAS2000. Estes alvos foram utilizados, para o georreferenciamento indireto das imagens do primeiro aerolevanteamento e para avaliação geométrica das ortofotos do segundo aerolevanteamento, ver figura 6.

Figura 6 – Os pontos em alaranjando é a localização dos alvos na área de pesquisa na ortofotos resultante do processo de integração.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os alvos foram pintados de branco no asfalto escuro para melhor visualização dos mesmos devido ao contraste que se obtém desta composição. A dimensão de cada alvo foi de 60 cm para que pudessem ser vistos na imagem aérea da câmara digital com 9 pixels.

As configurações dos voos realizados para os aerolevantamentos, citados no tópico 1.1, foram as seguintes: 1.000m de altura sobre o terreno, duas faixas em sentidos contrários, lente com distância focal nominal de 35 mm o que permitiu obter um pixel de 23 cm e velocidade da aeronave de 110 knots (204 km/h).

2.2.1 Determinação do POE da câmara digital (X'_0 , Y'_0 , Z'_0 , ω' , φ' , κ')

Depois de realizado o primeiro voo foram extraídos os dados do LiDAR para separá-los em duas partes, sendo a primeira, o INS da aeronave e a segunda os dados do Laser (tempos e ângulos). Com os dados do INS foi possível processar a trajetória da aeronave utilizando os arquivos brutos do GNSS da base de apoio em campo.

A trajetória do LiDAR foi processada pelo método GNSS cinemático, de dois modos: no primeiro o processamento foi realizado no sentido do voo, ou seja, da decolagem até a aterrissagem, e no segundo foi adotado o sentido

contrário, da aterrissagem até a decolagem. Neste tipo de ambiente computacional é possível selecionar a melhor parte de cada solução calculada, sendo que na primeira solução, a melhor parte é da metade da trajetória para o final (aterrissagem), já que as ambiguidades se fixam melhor no final da trajetória. Assim, a melhor parte da segunda solução é a metade inicial da trajetória. Desta maneira as duas soluções são compostas automaticamente definindo a melhor solução possível para a trajetória. Todos os dados processados da trajetória foram calculados em SIRGAS2000 e unidos com a atitude do IMU do LiDAR, utilizando o método do filtro de “Kalman”, gerando o POE da câmara digital no referencial do LiDAR ($X''_0, Y''_0, Z''_0, \omega'', \varphi'', \kappa''$).

Para determinar a posição X'_0, Y'_0 e Z'_0 no referencial da câmara digital, foi necessário realizado um levantamento topográfico local para determinar o braço (*Level Arms*) da câmara digital em relação ao INS do LiDAR ($\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$), ver figura 07.

Figura 7 – Determinação do *Level Arms* da câmara digital em relação ao INS do LiDAR.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores obtidos do levantamento topográfico local para ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 podem ser vistos na tabela 1.

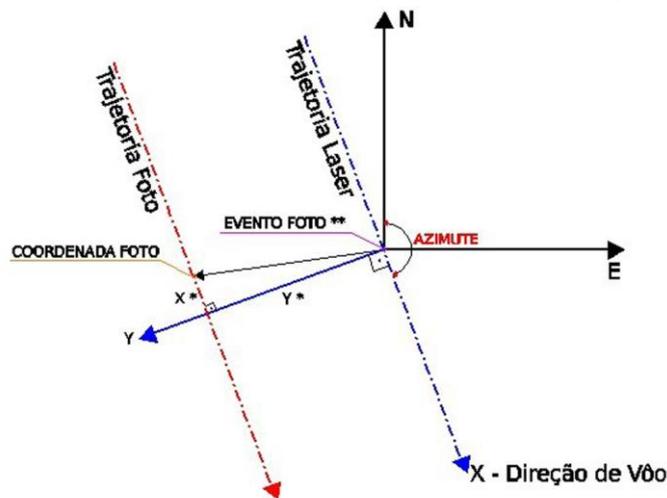
Tabela 1 – Level arms da câmara digital em relação ao INS EM METROS

ΔX_0 (m)	σ (m)	ΔY_0 (m)	σ (m)	ΔZ_0 (m)	σ (m)
-0,039	0,007	0,180	0,007	-0,074	0,007

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com os valores acima determinados foi possível calcular o centro perspectivo X'_0 , Y'_0 e Z'_0 da câmara digital através das equações 1, 2 e 3, deduzidas a partir da figura 08.

Figura 8 – Determinação de X'_0 , Y'_0 e Z'_0 utilizando as equações 1, 2 e 3.



* Distância do Centro Perspectivo ao Espelho do Sensor Laser
 ** Disparo Fotográfico Registrado na Trajetória do Sensor Laser

Fonte: Elaborada pelos autores.

$$X'_{0(Foto)} = X''_{0(INS)} + \text{sen} \left(\text{Azimute}_{(INS)} + \text{tg}^{-1} \frac{\Delta X_0}{\Delta Y_0} \right) \cdot \left(\sqrt{\Delta X_0^2 + \Delta Y_0^2} \right) \quad (1)$$

$$Y'_{0(Foto)} = Y''_{0(INS)} + \text{cos} \left(\text{Azimute}_{(INS)} + \text{tg}^{-1} \frac{\Delta X_0}{\Delta Y_0} \right) \cdot \left(\sqrt{\Delta X_0^2 + \Delta Y_0^2} \right) \quad (2)$$

$$Z'_{0(Foto)} = Z''_{0(INS)} + \Delta Z_0 \quad (3)$$

Depois de determinado o braço (*Level Arms*), foi realizado uma aerotriangulação no software “*Leica Photogrammetry Suite*” – LPS, ou seja, utilizando os pontos de apoio obtidos por GNSS, distribuídos conforme a figura 6, e apenas fixando o X_0 , Y_0 e Z_0 de cada imagem, já obtidos pelas equações 1, 2 e 3. A aerotriangulação foi utilizada para calcular a atitude da ω' , φ' , κ' da câmara digital. Estes valores foram utilizados para comparar com os valores já registrados pelo INS do LiDAR, determinando assim os valores de giro (*Boresight Angles*) $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, $\Delta\kappa$ da câmara digital em relação ao INS do LiDAR. Porém, nesta determinação foi necessário aplicar as seguintes equações:

1° Quadrante

$$\Delta\omega = \omega'_{Foto} - \omega''_{INS} \quad (4)$$

$$\Delta\varphi = -\varphi''_{ins} - \varphi'_{Foto} \quad (5)$$

$$\Delta\kappa = (90^\circ - \kappa''_{INS}) - \kappa'_{Foto} \quad (6)$$

2° Quadrante

$$\Delta\omega = \omega'_{Foto} + \omega''_{INS} \quad (7)$$

$$\Delta\varphi = -\varphi''_{ins} - \varphi'_{Foto} \quad (8)$$

$$\Delta\kappa = (270^\circ - \kappa''_{INS}) - \kappa'_{Foto} \quad (9)$$

3° Quadrante

$$\Delta\omega = \omega'_{Foto} + \omega''_{INS} \quad (10)$$

$$\Delta\varphi = \varphi'_{Foto} - \varphi''_{ins} \quad (11)$$

$$\Delta\kappa = (270^\circ - \kappa''_{INS}) - \kappa'_{Foto} \quad (12)$$

4° Quadrante

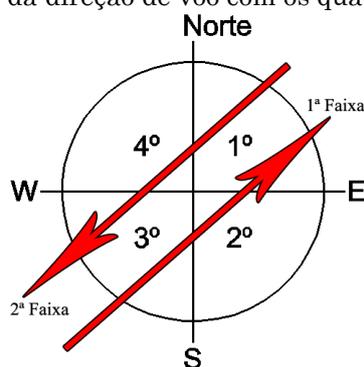
$$\Delta\omega = \omega'_{Foto} - \omega''_{INS} \quad (13)$$

$$\Delta\varphi = \varphi'_{Foto} - \varphi''_{ins} \quad (14)$$

$$\Delta k = (270^\circ - k''_{INS}) - k'_{Foto} \quad (15)$$

Para determinar a qual quadrante, e quais equações se devem utilizar, é necessário conhecer a direção do voo. Como pode ser visto na figura 2, a primeira faixa de voo teve a direção nordeste, logo para a determinação de $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, Δk se utilizou o sistema de equações do 1° quadrante, já para a segunda faixa de voo que teve a direção sudoeste se utilizou o sistema de equações do 3° quadrante, conforme figura 9.

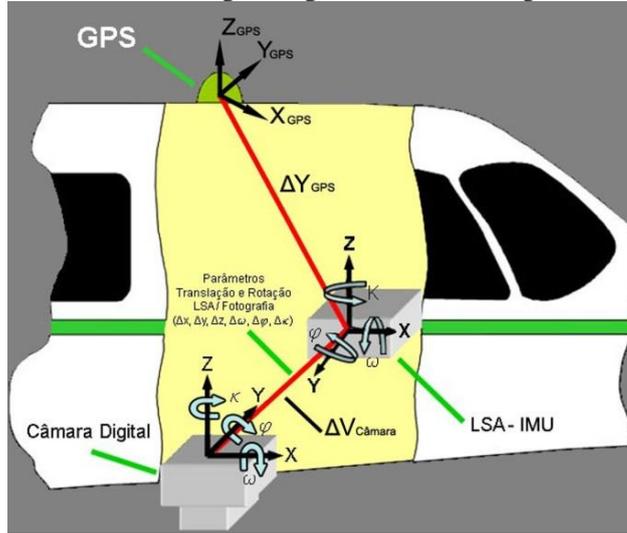
Figura 9 – Relação da direção de voo com os quadrantes da tabela 2.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Após determinado o ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , por topografia, e o $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, Δk (tópico 2.1), por georreferenciamento indireto, foi possível determinar por completo o vetor $\Delta V_{\text{câmara}}$, ou seja, o braço e o giro entre a câmara digital e o INS, ver figura 10.

Figura 10 – *Level Arms* e *Boresight Angles* da câmara digital em relação ao INS.



Fonte: Elaborada pelos autores.

2.2.2 Produção de Ortofotos

Para a geração das ortofotos foi realizado um segundo voo, 11 meses após a realização do primeiro voo, utilizando os mesmos equipamentos, câmara digital e LiDAR, para a obtenção dos dados necessários para a ortorretificação das imagens digitais oriundas da câmara de pequeno formato.

Com a determinação do braço e giro da câmara digital em relação ao INS do LiDAR ($\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa$), obtido com o primeiro voo, conforme apresentado no tópico 1.2.1, foi possível determinar de maneira direta os POE ($X'_0, Y'_0, Z'_0, \omega', \varphi', \kappa'$) da câmara digital no segundo voo. Primeiramente foi necessário processar a trajetória da aeronave, como visto no tópico 1.2.1, em seguida foi realizado o processamento dos dados brutos do LiDAR para obtenção do Modelo Digital de Terreno – MDT com coordenadas cartesianas no sistema SIRGAS2000.

Depois de obtido o MDT, iniciou-se o processamento para obtenção dos dados de georreferenciamento para em seguida ortorretificar as imagens da câmara digital. Após este procedimento, foi gerado um ortomosaico para a área de estudo, na projeção UTM. Este foi utilizado para verificar o método

proposto pelo georreferenciamento direto. Para isso foram realizados dois ortomosaicos, experimento A e B. Para o experimento A o processamento do ortomosaico não se utilizou de pontos apoio, obtidos em campo por GNSS, já no experimento B o processamento do ortomosaico se utilizou de quatro pontos de apoio, obtido em campo.

3 Resultados e Discussões

3.1 Determinação dos $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$, via INS do LiDAR

Para realizar a aerotriangulação pelo processo de georreferenciamento indireto, já citado no tópico 1.2.1, foi necessário inserir um desvio padrão de cada observação, como dado de entrada na aerotriangulação, ver tabela 3. Os valores de desvio padrão da tabela 3 foram definidos da seguinte maneira: ponto imagem, pela acuidade do operador da estação fotogramétrica; ponto de apoio, pela precisão do levantamento GNSS; e X'_0 , Y'_0 e Z'_0 , pela precisão do IMU.

Tabela 3 – Desvio padrão atribuído às observações na aerotriangulação

	DESVIO PADRÃO		
Ponto Imagem	$\sigma = 0,330$ pixel		$\sigma = 0,330$ pixel
Ponto de Apoio	$\sigma = 0,065$ m	$\sigma = 0,065$ m	$\sigma = 0,100$ m
X'_0, Y'_0 e Z'_0	$\sigma = 0,100$ m	$\sigma = 0,100$ m	$\sigma = 0,150$ m
POI	Fixo		

Fonte: Elaborada pelos autores.

Após, atribuídos o desvio padrão, foi realizado a aerotriangulação por bloco, para encontrar o $\Delta\omega$, $\Delta\phi$, $\Delta\kappa$ de cada imagem digital da câmara. Os resultados desta aerotriangulação foram obtidos pelo LPS e podem ser vistos na tabela 4.

Tabela 4 – Resultado da triangulação na determinação do giro (*boresight angles*)

		Terreno		
		X (m)	Y (m)	Z (m)
Apoio	Média dos Resíduos	-0,0705	-0,0434	-0,0922
	Desvio Padrão dos Resíduos	0,1625	0,1455	0,2145
	RMS – Erro Médio Quadrático	0,1751	0,1500	0,2308
Verificação	Média dos Resíduos	0,0242	-0,0867	-0,5913
	Desvio Padrão dos Resíduos	0,1544	0,2146	0,5539
	RMSE – Erro Médio Quadrático	0,1485	0,2213	0,7910

Fonte: Elaborada pelos autores.

Dos 47 alvos pré-sinalizados, ver figura 6, foram utilizados 37 pontos de apoio e 10 pontos de verificação, sendo estes pontos inseridos no LPS. O resultado desta aerotriangulação está de acordo com o esperado, pois apresentou valores de sigma dentro do esperado, já que o desvio padrão calculado é inferior a um sigma teórico de 23 cm para X e Y. Este valor teórico é obtido diretamente pela resolução espacial da imagem no terreno. Já o sigma teórico de 59 cm para Z é obtido em função da altura média de voo (H), distância média entre os centros perspectivos (B), distância focal (F) e a resolução espacial da imagem no terreno (δ), ver a equação 16.

$$\sigma Z_{Teórico} = \pm \frac{H^2}{B \cdot F} \cdot \delta \quad (16)$$

Os primeiros resultados obtidos mostravam que os valores de $\Delta\omega$ e $\Delta\phi$ não seguiam um padrão similar ao $\Delta\kappa$. Optou-se por retirar do cálculo os valores divergentes da tendência do resultado, ou seja, aqueles que apresentaram um erro grosseiro.

Tabela 5 – Diferenças de $\delta\omega$, $\delta\varphi$, $\delta\kappa$.

	Fotos	$\Delta\omega^\circ$	$\Delta\varphi^\circ$	$\Delta\kappa^\circ$
FAIXA 01	F_0029	0,206	0,546	0,363
	F_0030	-----	0,382	0,324
	F_0031	0,089	0,630	0,368
	F_0032	0,145	0,639	0,361
	F_0033	-----	-----	0,276
	F_0034	-----	0,011	0,281
	F_0035	-----	-----	0,240
	F_0036	0,064	0,484	0,324
	F_0037	0,123	0,560	0,334
	F_0038	0,271	0,617	0,357
	F_0039	0,522	0,914	0,397
FAIXA 02	F_0040	0,446	0,978	0,352
	F_0041	0,142	-----	0,289
	F_0042	-----	0,150	0,321
	F_0043	-----	-----	0,280
	F_0044	0,181	0,194	0,295
	F_0045	0,039	0,875	0,357
	F_0046	-----	-----	0,290
	F_0047	0,546	1,133	0,402
	F_0048	0,381	0,558	0,346
	F_0049	0,345	0,041	0,294
	F_0050	0,578	0,761	0,387
F_0051	0,368	0,163	0,318	
	MÉDIA	0,278	0,535	0,329
	DESVIO PADRÃO	0,180	0,329	0,043

Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com a estatística, são aqueles que se situam a uma distância da média superior a 3 vezes o desvio padrão. Já segundo da Silva e Carneiro da Silva (2015), demonstraram que o sistema de rotação com os ângulos ω , φ e κ do IMU é matematicamente instável, quando comparado com a Fototriangulação, devido a erros não modelados. Depois desta análise dos erros grosseiros foi construída uma amostra de dados para a determinação de $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$ e $\Delta\kappa$, conforme a tabela 5.

Depois de calculados os valores de $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$ e $\Delta\kappa$, foi determinado o vetor $\Delta V_{\text{câmara}}$, (ver figura 10), o qual foi posteriormente utilizado nos dados do

segundo aerolevanteamento, gerando dois experimentos, A e B. O resultado deste vetor $\Delta V_{\text{câmara}}$ pode ser visto na tabela 6.

Tabela 6 – Determinação de $\delta\omega$, $\delta\varphi$, $\delta\kappa$

	ΔX_0 (m)	ΔY_0 (m)	ΔZ_0 (m)	$\Delta\omega^\circ$	$\Delta\varphi^\circ$	$\Delta\kappa^\circ$
$\Delta V_{\text{câmara}}$	-0,039	0,180	-0,074	0,278	0,535	0,329
σ	0,007	0,007	0,007	0,180	0,329	0,043

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.2 Experimento A – Ortofotos na Escala 1/2.000, sem Pontos de Apoio

Seguindo a método do tópico 1.2.2 as ortofotos foram geradas na escala 1/2.000 sem a utilização de pontos de apoio na aerotriangulação, ou seja, foram geradas por georreferenciamento direto.

Para analisar o posicionamento da ortofoto gerada neste experimento foram realizadas análises estatísticas nas diferenças encontradas de 47 pontos entre o levantamento de campo e as ortofotos.

As análises estatísticas utilizadas neste experimento foram os testes de tendência e de precisão (ver tabela 7), usando como base o Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, do decreto-lei 89.817 de 1984.

Para o teste de tendência, foi utilizado o erro médio e o desvio padrão da tabela 7 para avaliar as diferenças encontradas, se estas são ou não tendenciosas. Para hipótese H_0 , o erro médio observado é igual a zero, ou seja, não é tendencioso e, para hipótese H_1 , o erro médio observado é diferente de zero, ou seja, é tendencioso. Neste teste, utilizou-se a distribuição de Student, com um nível de confiança de 90% e o número total de observações.

Para o teste de precisão, foi utilizado o desvio padrão do PEC e o desvio padrão da tabela 7, para avaliar as diferenças encontradas e se são ou não precisas. Para hipótese H_0 , o desvio padrão calculado é igual ao desvio padrão do decreto-lei, ou seja, o mapeamento atende à precisão pré-estabelecida no decreto-lei 89.817 e, para hipótese H_1 , o desvio padrão calculado é diferente

do desvio padrão do decreto-lei, ou seja, o mapeamento não atende à precisão pré-estabelecida no decreto-lei 89.817. Neste teste, utilizou-se a distribuição CHI-Quadrado, com um nível de confiança de 90% e o número total de observações, mais informações em Martins (2010).

Tabela 7 – Análise estatística das ortofotos no experimento A

Diferença entre os valores medidos com o GNSS e nas Ortofotos		
Média	E = -0,0536 m	N = 1,3738 m
Desvio Padrão	E = 1,1637 m	N = 0,8576 m
Teste de Tendência		
Limite t47 a 90%	E = 1,30 ⁽¹⁾	N = 1,30 ⁽¹⁾
Valor t calculado	E = 0,32	N = 10,98
Tendência	Não	Sim
Teste de Precisão		
Limite t47 a 90%	E = 59,78 ⁽²⁾	N = 59,78 ⁽²⁾
Valor t na escala 1/5000	E = 55,37	N = 30,07
Resultado do Padrão de Exatidão Cartográfica		
Escala Atingida do PEC	1/5.000	

⁽¹⁾ Valor obtido da distribuição Student.

⁽²⁾ Valor obtido da distribuição CHI-Quadrado.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para o experimento A podemos concluir que existe uma tendência dos dados no eixo norte. Já os resultados encontrados no desvio padrão apresentaram erros (E=1,1637 m e N=0,8576 m) superior ao permitido para a escala 1/2.000. Esta mesma situação também foi verificada ao aplicar o teste de precisão para a escala 1/2.000, onde obteve-se limites de 346,06 para o eixo leste e de 187,95 para o eixo norte, muito superior ao permitido que era de 59,78. Desta maneira o experimento A não atingiu a precisão esperada pelo decreto-lei 89.817/84.

3.3 Experimento B – Ortofotos na Escala 1/2.000, com Pontos de Apoio

Seguindo os mesmos passos do experimento A (tópico 3.2), porém com a inserção de quatro pontos de apoio na aerotriangulação, foram obtidas novas análises estatística (tabela 8).

Diferença entre os valores medidos com o GNSS e nas Ortofotos		
Média	E = -0,1070 m	N = -0,2091 m
Desvio Padrão	E = 0,2474 m	N = 0,2732 m
Teste de Tendência		
Limite t47 a 90%	E = 1,30	N = 1,30
Valor t calculado	E = 2,96	N = 5,25
Tendência	Sim	Sim
Teste de Precisão		
Limite t47 a 90%	E = 59,78	N = 59,78
Valor t na escala 1/2000	E = 15,64	N = 19,07
Resultado do Padrão de Exatidão Cartográfica		
Escala Atingida do PEC	1/2.000	

⁽¹⁾ Valor obtido da distribuição Student.
⁽²⁾ Valor obtido da distribuição CHI-Quadrado.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para o experimento B podemos concluir que existe uma tendência dos dados tanto para o eixo norte e como para o eixo leste. Já os resultados encontrados no desvio padrão apresentaram erros iguais a (E=0,2474 m e N=0,2732 m), os quais são permitidos para a escala 1/2.000 pelo decreto 89.817/84. Esta mesma situação foi verificada ao aplicar o teste de precisão para a escala 1/2.000, onde obteve-se limites de 15,64 para o eixo leste e de 19,07 para o eixo norte, muito inferior ao permitido que era de 59,78, podendo assim classificá-la como classe A na escala 1/2.000 pelo decreto 89.817/84.

4. Conclusões e Recomendações

No que se refere ao objetivo geral da pesquisa, a metodologia proposta para o georreferenciamento direto de imagens digitais utilizando dados do INS do LiDAR, visando à produção de ortofotos na escala 1/2.000, atendeu as especificações quando foram utilizados quatro pontos de apoio. Porém, quando não foram utilizados estes pontos de apoio, a ortofoto conseguiu chegar a uma precisão de escala igual a 1/5.000.

Logo, para se fazer um georreferenciamento direto com imagens digitais, ainda existe a necessidade de se levantar pelo menos quatro pontos de apoio. Estes pontos entram na aerotriangulação para refinar os parâmetros de orientação exterior obtidos do INS. Isto é necessário devido à falta de exatidão na determinação dos valores de giro ($\Delta\omega$, $\Delta\phi$), entre o INS do LiDAR e a câmara digital.

Recomenda-se ao leitor uma análise mais profunda sobre os ângulos de atitude (ω , ϕ , κ) das imagens digitais. Nesta pesquisa foi realizada uma simplificação, onde os ângulos de atitude do Sistema Inercial de Navegação (Roll, Pitch e Heading) do LiDAR são aproximadamente iguais aos ângulos de atitude do sistema fotogramétrico (ω , ϕ , κ). Porém, para melhorar esta integração devemos analisar melhor esta transformação matemática entre estes dois sistemas angulares, já que cada um dos sistemas realiza suas operações matemáticas em sistemas diferentes de ângulos de atitude.

Outra recomendação ao leitor são os cuidados com relação à calibração do sistema, tanto nos Parâmetros de Orientação Interna da câmara digital, bem como na calibração dos ângulos de montagem (*Boresight Angles*) entre a câmara digital e o Sistema Inercial de Navegação, pois ao se retirar estes equipamentos da aeronave devemos realizar novas calibrações para garantir a precisão alcançada nesta pesquisa.

Apesar desta pesquisa ainda precisar de análises na transformação dos ângulos de atitude do Sistema Inercial de Navegação e a câmara digital, a

pesquisa obteve sucesso na integração de baixo custo entre os sistemas LiDAR e Câmara Digital. Esta integração traz muitas vantagens como: rapidez na obtenção da ortofotos; menor número de pontos de apoio; possibilidade de obtenção de pontos de apoio extraídos da nuvem de pontos LiDAR para a orientação das imagens; a eliminação da restituição estereoscópica na determinação do modelo digital de superfície – MDS; possibilidade de realizar ortofotos em lugares de difícil acesso, como por exemplo, em regiões florestais, lagos, áreas litorâneas e ilhas já que podemos obter pontos de apoio por GNSS nas bordas desta região e na parte interna podemos extrair pontos da nuvem do sistema LiDAR; e obtenção do MDS de forma automática pelo processo de “Structure from Motion” – SfM, para aumentar a densidade da nuvem de pontos LiDAR a partir das imagens da câmara digital. Desta maneira em pesquisas futuras cabe uma análise na integração entre modelos de superfície obtido pelo LiDAR e pelo SfM. Assim, com um modelo de superfície mais denso será possível realizar de maneira automatizada a geração de “true-orto”, ou seja, ortofotos corrigidas ao nível do solo, bem como ao nível das edificações.

Por fim, como esta pesquisa limitou-se a uma área de 10 km² e uma altura de aerolevanteamento de 1.000 m, recomenda-se que sejam efetuadas pesquisas com áreas maiores para a verificação da quantidade mínima de pontos de apoio em alturas variadas para analisar o comportamento da determinação do braço (*Level Arms*) e do giro (*Boresight Angles*), ou seja, na determinação de ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0 , $\Delta \omega$, $\Delta \phi$, $\Delta \kappa$, bem com as precisões alcançadas das ortofoto produzidas por esta metodologia em outras escalas e outras alturas de voo.

Agradecimentos

Os autores desta pesquisa desejam externar seus agradecimentos ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos LACTEC), que viabilizou a pesquisa disponibilizando os dados do Sistema de Laser Scanner

Aerotransportado, as imagens digitais e as ferramentas para o desenvolvimento da pesquisa, ao órgão nacional de fomento CNPq, que apoiou uma parte dos estudos e da pesquisa; e por fim, à Universidade Federal do Paraná e principalmente ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que apoiaram e acreditaram nesta pesquisa desde o início.

Referências

- AKKAYNAK, D., TREIBITZ, T., XIAO, B., GÜRKAN, U. A., ALLEN, J. J., DEMIRCI, U., HANLON, R. T. Use of commercial off-the-shelf digital cameras for scientific data acquisition and scene-specific color calibration. **Journal of the Optical Society of America**, A 31, no. 2, v. 312, 2014.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 1ª edição, SBEE, 1999.
- CRAMER, M., STALMANN, D., HAALA, N. Using GPS/Inertial exterior orientation measurements for photogrammetric point determination. **ISPRS Workshop Com. III**, v. 1, 1999.
- HABIB, A., MORGAN, M. Small format digital cameras for mapping applications: Calibration and Stability Analysis. **Série em Ciências Geodésicas** 3, 2003. pp. 3-25.
- GNEENISS, A. S.; MILLS, J. P., MILLER, P.E. In-flight photogrammetric camera calibration and validation via complementary lidar. **ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.** v. 100, 2015. pp. 3-13.
- HABIB, A., MORGAN, M. Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** 71.6, 2005. pp. 733-741.
- HEIPKE, C, JACOBSEN, K., WEGMANN, H. Analysis of the results of the OEEPE test 'integrated sensor orientation. in Proc. Eur. Org. Exp. **Photogrammetric Res. Integr. Sensor Orientation**, Test Rep. Workshop, 2002. pp. 31-49.
- GONÇALVES, G. A. Detecção Automática de Alterações na Cartografia Cadastral com Base em Imagens de Câmaras Digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas** v. 13, n. 2, 2006.

- LAFARGE, F., DESCOMBES, X., ZERUBIA, J., PIERROT-DESEILLIGNY, M. Structural approach for building reconstruction from a single DSM. **IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.**, 2010. pp. 135–147.
- LIN., H., GAO, J., ZHOU, Y., LU, G., YE, M., ZHANG, C. Semantic decomposition and reconstruction of residential scenes from LiDAR data. **ACM: Trans Graph** v. 32, n. 4, 2013. pp. 1–10.
- LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. Editora UFPR, 1987.
- MACHADO, A. M. L., MITISHITA, E. A., SANTOS, R. L., BARBOSA, F. P. Verificação da Estabilidade Geométrica dos parâmetros de calibração de uma câmara digital de pequeno Formato Sony DSC-F717. **Série em Ciências Geodésicas** v. 3, 2003. pp. 292-309.
- MACHADO, A. M. L. **Extração Automática de Contornos de Edificações Utilizando Imagem Gerada por Câmara Digital de Pequeno Formato e Dados LiDAR**. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Paraná, 2006. 201 p.
- MARTINS, M. A. R. **Geração de ortoimagens a partir de georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato com dados LiDAR**, dissertação de mestrado da Universidade Federal do Paraná, 2010.
- MITISHITA, E. A., HABIB, A., CENTENO, J. AND MACHADO. A. M. L., LAY, J., WONG, C. Photogrammetric and Lidar Data Integration Using the Centroid of a Rectangular Roof as a Control Point. **The Photogrammetric Record**. v. 23 n.121, 2008. pp. 19-35.
- MITISHITA, E. A., DEBIASI, P., KERSTING, A. P., CENTENO, J. A. S., MACHADO, A. L. A study on in situ calibration of an off-the-shelf digital camera integrated to a LIDAR system. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 12, 2016. pp. 5513-5523.
- NAN, L., SHARF, A., ZHANG, H., COHEN-OR, D., CHEN, B. Smart boxes for interactive urban reconstruction. **ACM Trans Graph**. v. 29, n. 4, 2010. pp. 1–10.
- PIERROT-DESEILLIGNY, M., CLERY, I. Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. **ISPRS –**

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII 5/W16**, 2011. pp. 269– 276.
- POULLIS, C., YOU, S. Automatic reconstruction of cities from remote sensor data. In: **IEEE conference on computer vision and pattern recognition**, 2009. pp 2775–2782.
- SANTOS, R. L., TOMMASELLI, A., GALO, M., HASEGAWA, J., DAINEZ, R., RODRIGES, Z. Aplicação de Câmaras Digitais na Produção de Ortofotocarta. **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**, 2000.
- SANTOS, R. L. Calibração de câmeras digitais não métricas e de pequeno formato utilizando o pixel como unidade no espaço imagem. **Universidade Federal do Paraná**, 2006.
- SANTOS, R. L. **Extração Automática de Pontos de Apoio para Integração de Imagens Aéreas Digitais e Dados de Perfilamento Laser Aerotransportado**. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Paraná, 2007. 132 p.
- DA SILVA, A. M., CARNEIRO DA SILVA, D. Resseção espacial em fotogrametria com quatérnios. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 4, 2015.
- ŠKALOUD, J., CRAMER, M., SCHWARZ, K. P. Exterior Orientation without Ground Control. In **Proc. of the International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS**, Commission, v. 3, 1996. pp. 125-130.
- TOMMASELLI, A. M. G., REISS, M. L. L. A Photogrammetric Method For Single Image Orientation And Measurement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** v. 71,. n. 6, 2005. pp. 727-732.
- VANEGAS, C. A., ALIAGA, D. G., BENES, B. Automatic extraction of Manhattan-World building masses from 3D laser range scans. **IEEE Trans Vis Comput Graph**, v. 18, n. 10, 2010. pp. 1627–37.
- WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., REYNOLDS, J. M. “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, 2012. pp. 300-314

- Y. ZHANG, Y., SHENA, X. Direct georeferencing of airborne LiDAR data in national coordinates. *ISPRS J. Photogrammetric Remote Sensor*, v. 84, 2013. pp. 43–51
- Y. ZHANG, Y., SHENB, X. Approximate correction of length distortion for direct georeferencing in map projection frame. *IEEE Geoscience Remote Sensor Lett.*, v. 10, n. 6, 2013. pp. 1419–1423.
- ZHAO, H., ZHANG, B., WU, C., ZUO, Z., CHEN, Z., BI, J. Direct georeferencing of oblique and vertical imagery in different coordinate systems. *ISPRS J. Photogrammetric Remote Sensor*, v. 95, 2014. pp. 122–133.
- ZHOU, Q. Y., NEUMANN, U. 2.5D building modeling by discovering global regularities. In: *CVPR. IEEE Computer Society*, 2012. pp. 326–333.