

Subsídios para Obtenção e Atualização de Base Cartográfica a partir de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato

MS Luciana Suaid Tomazi Vasco ¹
Prof. MS José Carlos Ribeiro ²

¹ IBGE – DIGEO/SUL
Florianópolis – SC
Fone:(48) 225 0900
✉ lutomazi@ibge.gov.br

² UFV – Depto. Engenharia Florestal
Viçosa – MG
Fone:(31) 899 1223
✉ jcribeiro@ufv.gov.br

Conteúdo	
	1 Introdução
	1.1 Objetivo
	2 Revisão de Literatura
	2.1 Câmaras Aéreas
	2.2 Fotografias Aéreas de Pequeno Formato
	2.3 Elementos das fotografias aéreas
	2.4 Coordenadas Terrestres
	3 Desenvolvimento
	3.1. Localização e caracterização da área
	3.2 Metodologia
	3.2.1 Fotografias Aéreas
	3.2.2 Apoio de campo
	3.2.3 Coordenadas Fotográficas
	3.2.4 Método considerando a foto vertical
	3.2.5 Método de Church
	3.2.6 Método das equações de colinearidade
	3.2.7 Verificação da Exatidão
	3.2.8 Padrão de Exatidão Cartográfica
	4 Conclusões e Recomendações
	5 Referências Bibliográficas

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo determinar procedimentos para correção de dados provenientes de fotografias aéreas de pequeno formato, obtidas a partir de câmara não-métrica a bordo de avião de pequeno porte. Na área de estudo foram determinados pontos de apoio terrestre. As coordenadas terrestres dos pontos fotográficos foram determinadas por três métodos: da foto vertical; de Church e das equações de condição de colinearidade. O método de Church teve as altitudes corrigidas pelos métodos: interpolação de Mc Dougall e interpolação linear dupla. Os resultados foram classificados de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica para uma carta na escala 1:10.000. A partir destes concluiu-se que o material fotográfico corrigido pelos métodos das equações de colinearidade e Church, atingiu os Padrões de Exatidão Cartográfica. Tais resultados mostram ser viável o uso destas fotografias para atualização cartográfica.

Palavras chave: Fotografia Aérea de Pequeno Formato, Restituição Analítica, Atualização Cartográfica.

Abstract: The present study in order to determine correction procedures of data from small format aerial photographs. These photographs were obtained from non metric cameras on small size airplanes. In the area covered horizontal and vertical coordinates were determined from points surveyed in the field. Three methods were used to determine the ground coordinates of the photographic points: the vertical photograph, the Church, and the collinearity equation methods. The altitudes of the method of Church were corrected by two methods: the interpolation of Mc Dougall and the double linear interpolation. The results obtained were classified according to the Cartographic Accuracy Standard for a map in the 1:10,000 scale. From this work it was concluded that the photographs corrected by the methods of the collinearity equations and of Church, aiming at a final product in a 1:10,000 scale, had a satisfactory behaviour in relation to the Cartographic Accuracy Standard, the results obtained showed the viability of the use of these photographs for works of cartographic updating.

Keywords: Small Format Aerial Photographs, Analytic Restitution, Cartographic Updating.

1 Introdução

As informações geográficas, obtidas pelas diferentes formas de mapeamento, dão base à realização de análises espaciais que se destinam à compreensão e à descrição da organização e da gestão do Território Nacional (IBGE, 1996).

O Governo Federal foi o maior contratante de serviços de aerolevantamento privado até a Constituição de 1988. As mudanças na política do Governo Federal provocaram o desaquecimento das atividades de mapeamento, requerendo uma reavaliação do modelo de sua produção. Paralelamente, com a intensificação do uso da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), aumentaram as demandas por cartas topográficas, inclusive no formato digital (IBGE, 1996).

Apesar dos recursos da tecnologia de ponta, os usuários têm que encontrar soluções próprias para obter mapas atuais. Conversão de mapas analógicos para o formato digital, atualizações, mapeamentos sistemáticos pagos pelos próprios usuários, convênios, mapeamentos simplificados são alternativas para diminuir os custos e acelerar a produção dos mapas. O universo de usuários mudou: as prefeituras de pequeno e médio porte, reflorestadoras e ONG's (Organizações Não Governamentais) ganharam mais espaço (O BRASIL, 1995).

A falta de manutenção da base cartográfica pelos usuários leva a remapeamentos, que dilapidam os cofres públicos e multiplicam mapas com padrões diferentes. Devem ser previstos gastos com preservação e atualização dos dados (O BRASIL, 1995).

As imagens de satélites em muitos casos são usadas para atualização dos mapeamentos, mas escalas maiores necessitam de melhor resolução. Uma solução estudada é o uso de fotografias aéreas de pequeno formato que devem ser corrigidas devido às distorções provocadas pelos deslocamentos radiais do relevo, inclinação da câmara, condições da revelação e outros fatores.

1.1 Objetivo

Considerando a importância de se buscar alternativas para composição e atualização de bases cartográficas, este trabalho teve como objetivo geral avaliar fotografias aéreas de pequeno formato sob o ponto de vista cartográfico. Os objetivos específicos foram:

- Determinar procedimentos para correção de dados provenientes de fotografias aéreas de pequeno formato, obtidas a partir de câmara não-métrica a bordo de avião de pequeno porte, tomando possível seu uso em mapeamentos de qualidade;
- Comparar métodos de restituição fotográfica de fácil implementação sob estereoscópios e microcomputadores.

2 Revisão de Literatura

2.1 Câmaras Aéreas

Segundo LILLESAND e KIEFER (1994) fotografias aéreas podem ser tomadas com qualquer tipo de câmara. Muitas aplicações bem sucedidas têm empregado fotografias aéreas tomadas de pequenos aviões com câmaras de 35mm e 70mm. A simplicidade e baixo custo de aquisição e operação de pequenas câmaras fazem delas sensores ideais para análise de pequenas áreas. Entretanto a maioria das fotografias aéreas utilizadas em mapeamento são feitas com câmaras aéreas de precisão. Estas câmaras são construídas especificamente para tomar um grande número de fotografias em sucessões rápidas e com fidelidade geométrica.

Fotografias tomadas a partir de câmaras métricas podem ser restituídas em restituidores analógicos devido às pequenas distorções nas lentes e orientação relativa controlada. Enquanto dados de câmaras não métricas devem ser tratados por métodos analíticos em computadores. Entretanto é mais uma questão de método de restituição que de precisão o uso de câmara métrica ou não métrica (KÖLBL, 1976).

2.2 Fotografias Aéreas de Pequeno Formato

Segundo DISPERATI (1991) nos últimos anos tem se tornado popular a obtenção de fotografias aéreas de pequeno formato (FAPEFs) para aplicações relacionadas com o meio ambiente, engenharia e planejamento. Estas fotografias são obtidas através de câmaras fotográficas não-métricas, denominadas comumente de 35 mm ou 70 mm.

De acordo com WARNER et al. (1996) grande parte do mundo está mapeado em escalas pequenas. Com o aumento industrial e desenvolvimento urbano, existe uma demanda para mapeamento em escalas grandes bem como atualizações destes mapeamentos. Devido ao processo convencional ter um alto custo, existe um crescente interesse em métodos menos onerosos, usando por exemplo, câmaras de pequeno formato acopladas à aviões de pequeno porte, navegando por GPS.

GISIGER et al. (1996) comparam o valor de uma câmara métrica 35 mm, que custa aproximadamente 10.000 dólares, com o de uma câmara SLR comum (não-métrica), sendo o valor da primeira superior em mais de dez vezes. Já uma câmara métrica convencional (23x23cm) tem seu valor 300 vezes maior que o de uma câmara comum.

WARNER et al. (1996) afirmam ainda que o avião é o aspecto econômico mais importante que deve ser considerado, e os aviões de pequeno porte, como os modelos Cessna 172 e 180/182, são consideravelmente mais baratos, para os fins de mapeamento, que aqueles usados para os levantamentos aerofotogramétricos convencionais.

Apesar das vantagens acima citadas, o mapeamento de pequenas áreas com fotografias aéreas de pequeno formato encontra um problema : o grande número de pares estereoscópicos resultando em grande número de pontos de controle. A solução deste problema é a introdução do GPS no apoio de campo, diminuindo o tempo gasto para realizar o levantamento das coordenadas terrestres dos pontos de controle. A combinação de fotografias aéreas de pequeno formato e GPS forma um conceito econômico que mostra grandes promessas para o futuro do mapeamento (Heimes et al., 1993 citado por WARNER et al., 1996).

Segundo DISPERATI (1991) a aplicação das FAPEFs tem sido mais intensa no mapeamento temático, em diversos assuntos relacionados a florestas, geologia, uso do solo urbano e rural, geografia, arqueologia, estudos de regiões costeiras, etc. Todavia, já existem estudos procurando avaliar a potencialidade das FAPEFs para o mapeamento topográfico, como meio de extração de dados para Sistemas de Informações Geográficas e produção de Modelos Digitais de Terreno.

2.3 Elementos das fotografias aéreas

OLIVEIRA (1983) define atitude para fins de fotogrametria como a "orientação angular de uma câmara, ou de uma fotografia tirada desta câmara, de acordo com algum sistema de referência externo". Seis parâmetros independentes chamados de elementos de orientação exterior expressam a posição no espaço e a orientação angular de uma fotografia oblíqua. A posição espacial é normalmente dada pelas coordenadas tridimensionais (X_L, Y_L, Z_L) da estação de exposição num sistema de coordenadas terrestres. Z_L é comumente chamado H , altura de vôo sobre o datum. Orientação angular é a magnitude e direção do "tilt" na foto. Três ângulos são suficientes para definir a orientação angular. Dois sistemas são mais conhecidos na definição da atitude da câmara: o sistema *tilt-swing-azimute* ($t-s-\alpha$), representado na figura 1, e o sistema *ômega-fi-capa* ($\omega-\phi-\kappa$), representado na figura 2 (WOLF, 1983).

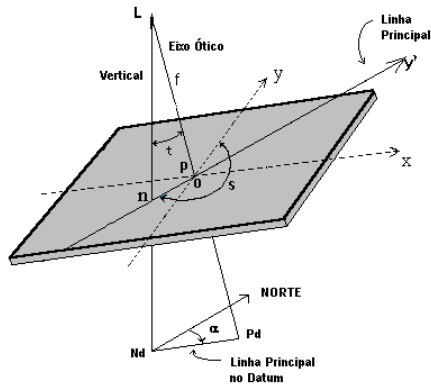


Fig. 1 : Parâmetros de orientação angular *tilt* (t), *swing* (s) e *azimute* (α)

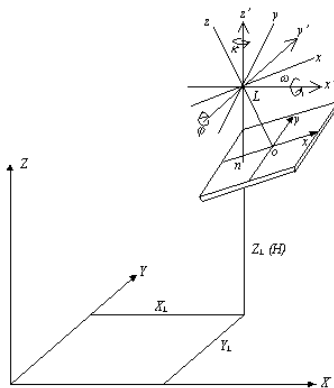


Fig. 2 : Orientação de uma fotografia oblíqua no sistema ω, ϕ, κ (WOLF, 1983).

Para qualquer fotografia inclinada existe um único conjunto de ângulos *ômega*, *fi* e *capa* (ω, ϕ, κ) que define a orientação angular da fotografia em relação ao sistema de coordenadas terrestres. Existe uma relação entre o sistema *tilt, swing e azimute* e o sistema *ômega, fi e capa*. Qualquer que seja o sistema a posição no espaço de uma fotografia é dada pelas coordenadas terrestres da estação de exposição X_L, Y_L e Z_L (ou H) (WOLF, 1983).

2.4 Coordenadas Terrestres

WOLF (1983) afirma que para se determinar as coordenadas terrestres de pontos contidos numa fotografia aérea pode-se estabelecer um sistema arbitrário de eixos cartesianos equivalente ao de coordenadas fotográficas, onde a origem é a projeção do ponto nadiral sobre o datum (plano de referência). Nas fotografias verticais a posição do ponto nadiral é coincidente com a posição do ponto principal. As coordenadas terrestres de um ponto são obtidas através das equações (1).

$$X_Q = x'_q * \frac{H - h_Q}{f / \cos(t) - y'_q * \tan(t)}$$

$$Y_Q = y'_q * \cos(t) * \frac{H - h_Q}{f / \cos(t) - y'_q * \tan(t)}$$
(1)

onde,

X_Q, Y_Q – coordenadas terrestre de um ponto qualquer Q;

x'_q, y'_q – coordenadas de um ponto fotográfico qualquer q no sistema auxiliar de coordenadas;

f – distância focal;

H – altitude de vôo;

h_Q – altitude de um ponto qualquer Q;

t – *tilt* da fotografia.

As coordenadas terrestres podem posteriormente ser transformadas para um sistema de projeção conhecido, como o sistema UTM por exemplo.

3 Desenvolvimento

3.1. Localização e caracterização da área

A área de estudo localiza-se no município de Viçosa, região da Zona da Mata, estado de Minas Gerais e sua maior parte é de propriedade da Universidade Federal de Viçosa. A área tem aproximadamente 250 ha e se encontra entre as latitudes 20° 45'00"S e 20° 46' 05"S e longitudes 42° 50' 50"W e 42° 52'10"W. O local tem relevo acidentado e características rurais com plantios de eucaliptos, lavoura, mata nativa, pastos e pomares.

3.2 Metodologia

Para atingir os objetivos do trabalho 30 pontos representados no par estereoscópico foram levantados no campo, sendo as coordenadas obtidas assumidas como verdade de campo. Posteriormente estes mesmos pontos tiveram suas coordenadas determinadas por três métodos baseados nos dados das fotografias aéreas. Os resultados obtidos foram comparados com a verdade de campo e classificados de acordo com o Padrão de exatidão Cartográfica.

A correção dos pontos na fotografia foi feita por três métodos: o método considerando a foto vertical, o método de Church e o método de resecção espacial por colinearidade. As equações envolvidas nos métodos de correção foram inseridas em programas computacionais desenvolvidos na Universidade Federal de Viçosa. Todos os três métodos envolvidos usam as coordenadas fotográficas junto a outros elementos para determinar as coordenadas terrestres dos pontos.

Neste trabalho são apresentadas apenas as equações principais do estudo. O conteúdo completo do estudo, bem como todas as equações e seus desenvolvimentos estão disponíveis na tese de mestrado do primeiro autor intitulada "Subsídios para Obtenção e Atualização de Base Cartográfica a partir de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato" do ano de 1999 da Universidade Federal de Viçosa.

3.2.1 Fotografias Aéreas

A área envolvida neste estudo foi coberta por um vôo fotográfico na escala aproximada 1: 40.000, realizado em 1994 pelo NEPUT (Núcleo de Estudos sobre o Planejamento e Uso da Terra) da Universidade Federal de Viçosa. As fotografias foram obtidas por uma câmara Hasselblad 4/50T modelo 553 ELX grande angular com uma lente de 50 mm de distância focal, utilizando filme de 70 mm bobinado. A câmara foi acoplada a fuselagem de um avião de pequeno porte CESSNA 182-Skylane. O par estereoscópico de aerofotos que cobre a área em estudo foi tomado na escala, aproximada, 1:39.500, escala do negativo.

Num laboratório fotográfico comercial as fotografias foram ampliadas no tamanho 23 x 23cm (formato das aerofotos convencionais), a escala destas ampliações ficou em 1:9.980 e sobre elas foram baseadas todas as medidas fotogramétricas realizadas no trabalho. Nos vôos aerofotogramétricos convencionais o negativo tem 23 x 23 cm e a revelação é feita por contato e não por ampliação para minimizar erros. As escalas foram estimadas com base em distâncias medidas na foto e no terreno, entre dois pontos de altitudes similares. Devido ao fato de ser um laboratório fotográfico comercial comum as ampliações não foram feitas com aparelhos que garantissem o paralelismo entre o negativo e a cópia positiva. A expectativa é de que as correções introduzidas estejam também solucionando esta fonte de erro. Uma outra cópia ainda mais ampliada de uma das fotos foi feita, na escala aproximada 1:4.250, para auxiliar o reconhecimento dos pontos no campo.

Com a ampliação das fotografias para o formato 23x23 cm tem-se uma nova distância focal f' (hipotética) diferente da distância focal (f). Pela equação (2), com base em medidas tomadas, com escalímetro de precisão, no negativo e na ampliação determinou-se f' . Ficando avaliada a distância focal em 198,011 mm, adotada para todos os cálculos envolvidos neste trabalho.

$$\frac{f}{f'} = \frac{\text{Distância}_{\text{negativo}}}{\text{Distância}_{\text{foto}}} \quad (2)$$

O ponto principal de cada fotografia foi determinado no cruzamento das diagonais que ligam os cantos opostos da foto, e conferido pelas linhas que ligam o ponto médio de lados opostos. Com o auxílio de um estereoscópio de espelho foram marcados também os pontos principais conjugados (ponto principal de uma foto que aparece na foto seguinte ou na foto anterior) e determinada a direção da linha de vôo. Então o par estereoscópico foi montado.

3.2.2 Apoio de campo

Na região de estereoscopia do par de fotografias, sob visão tridimensional, foram escolhidos pontos distribuídos na área para o apoio de campo. Para a realização deste trabalho seriam necessários no mínimo 6 pontos de apoio distribuídos nas extremidades e laterais da área de estereoscopia, que serviriam como pontos de controle nas diversas etapas da pesquisa. Este número mínimo de pontos não possibilitariam a posterior verificação da exatidão, então escolheu-se 30 pontos de apoio, sendo dois pontos representados em apenas uma fotografia do par.

O reconhecimento dos pontos de apoio se deu com o auxílio da foto ampliada, sendo estes materializados no local com piquetes e estacas, e suas coordenadas determinadas no sistema de projeção UTM através de receptores GPS da marca GARMIN modelo GPS 100 SRV II com precisão de 1 a 3m para posicionamento estático diferencial, e Estação Total (teodolito eletrônico com distanciômetro) da marca PENTAX modelo PCS 200 e precisão de 3mm \pm 3ppm nas distâncias e 5" (cinco segundos) nos ângulos.

O levantamento com GPS foi feito no modo diferencial estático pós-processado, com cada ponto sendo ocupado durante uma hora. O software usado para o processamento foi o PC100S2 desenvolvido pelo fabricante dos receptores GPS. Este método requer o uso de dois receptores: um numa base de coordenadas conhecidas e outro no ponto de coordenadas a determinar. O ponto escolhido como base faz parte da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e está localizado no campus da universidade Federal de Viçosa. As observações GPS para cada ponto de campo tiveram PDOP (diluição da precisão) entre 1 e 1,48 (valores médios) e apenas dois pontos foram observados com possibilidade de capturar satélites com ângulo horizontal inferior à 15° de ângulo de máscara.

O sistema GPS ainda não determina altitudes com precisão e para sanar este problema todos os pontos levantados por receptores GPS tiveram suas altitudes determinadas por nivelamento geométrico. Outro fator limitador do uso do GPS é a necessidade de uma boa visibilidade do céu no ponto a ser ocupado, alguns pontos não dispunham desta característica e suas coordenadas foram determinadas através de uma poligonização eletrônica usando uma estação total, que serviu também para densificar a rede de pontos de apoio.

O nivelamento geométrico, dos pontos levantados por receptor GPS, foi feito em vários circuitos e os erros ficaram entre 0,002 e 0,108 m, sendo o erro médio de 0,030 m.

O método de poligonização eletrônica teve uma precisão de 1/6338, significando que o erro linear é da ordem de 0,16 m por quilômetro. O erro altimétrico para este método foi de 0,34 m distribuídos entre os pontos levantados. Três pontos levantados pelo IBGE com GPS geodésico fizeram parte da poligonização eletrônica, e ao final, as coordenadas calculadas de dois deles foram comparadas com as determinadas pelo IBGE. As diferenças foram de 0,062 m e 0,215 m. Alguns pontos tiveram suas coordenadas planimétricas determinadas pela poligonização eletrônica e por GPS, as diferenças entre eles variaram de 0,96 a 1,54 m.

3.2.3 Coordenadas Fotográficas

Para a determinação das coordenadas fotográficas um estereoscópio de espelhos e uma barra de paralaxe equipada com um traçador foram usados para transferir os pontos do par estereoscópico para uma folha de papel poliéster transparente de boa estabilidade, com a operação sendo realizada sob visão estereoscópica. Dessa forma haveria uma maior precisão na determinação dos pontos do que se marcados diretamente de uma fotografia. A operação foi realizada duas vezes, uma para cada foto. Quando a foto da direita era de interesse a parte fixa da barra de paralaxe ficava sobre ela, o mesmo acontecendo para a foto da esquerda.

Os pontos nas folhas de poliéster (uma para cada foto) foram digitalizados em mesa digitalizadora da marca Summagraphics modelo SUMMAGRID III. Os arquivos resultantes contêm o número do ponto e as coordenadas de mesa que através de uma rotina programada foram convertidas em coordenadas fotográficas em milímetros, cuja origem foi o ponto principal de cada fotografia, o eixo x na direção da linha de vôo e perpendicular a ele o eixo y. Os pontos de controle transferidos para o papel poliéster foram digitalizados 3 vezes para cada foto. Análises estatísticas os três conjuntos de pontos mostraram-se iguais ao nível de 1% de probabilidade. Então fez-se a média das coordenadas de cada ponto.

Os métodos considerando a foto vertical e Church usaram altitudes calculadas por paralaxe, conforme equação 4. Assim as leituras de todos os pontos de apoio, localizados na região de estereoscopia das fotos, foram feitas com a barra de paralaxe da marca WILD. Para evitar erros, um operador experiente fez todas as leituras de paralaxe, e cada ponto foi lido duas vezes, sendo posteriormente feita a média das leituras.

$$\Delta h = \frac{H_0 \Delta p x}{b_0 + \Delta p x} \quad (4)$$

em que,

Δh - desnível entre um ponto qualquer e o plano de referência;

$\Delta p x$ - diferença de paralaxe x entre o ponto e o plano de referência;

b_0 - estereobase ajustada ao plano de referência;

H_0 - altura de vôo sobre o plano de referência.

Segundo WONG (1980) a equação 4 fornece o desnível entre um ponto e um plano de referência π_0 em um par estereoscópico. Sendo para isso, necessário se conhecer a altura de vôo sobre o plano de referência π_0 , e a fotobase ajustada ao plano de referência. Esta fotobase é a distância que separa os dois centros das fotografias, que formam o estereopar, subtraída da distância entre as imagens homólogas de um ponto qualquer do terreno, localizado sobre o plano de referência.

Um método mais preciso que também determina altitudes é o das equações de condição de colinearidade, o qual depende da orientação exterior da câmara.

3.2.4 Método considerando a foto vertical

As fotos foram consideradas verticais e todos os cálculos foram realizados sem introdução de qualquer tipo de correção nos resultados finais. Os dados de coordenadas fotogramétricas usados foram os da esquerda.

Segundo WOLF (1983) a altitude de vôo é um elemento importante e frequentemente necessário para resolver as equações básicas da fotogrametria. Altitudes de vôo com certa precisão podem ser determinadas facilmente a partir de dois pontos na foto que tenham suas coordenadas de campo (X, Y, Z) conhecidas.

$$(AB)^2 = (X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 \quad (5)$$



Fig. 3 : Área coberta pela região de estereoscopia das fotografias
- para ampliar clicar na imagem -

A equação (5) é baseada no teorema de Pitágoras em que a distância no campo entre dois pontos A e B é descrita em função de suas coordenadas terrestres.

$$(AB)^2 = \left[\frac{x_b}{f}(H - h_b) - \frac{x_a}{f}(H - h_a) \right]^2 + \left[\frac{y_b}{f}(H - h_b) - \frac{y_a}{f}(H - h_a) \right]^2 \quad (6)$$

Na equação (6) apenas a altitude de vôo H é desconhecida. Quando todos os valores conhecidos são inseridos na equação, esta passa para a forma quadrática $aH^2 + bH + c = 0$. Desta equação sairão dois valores para H, sendo um deles absurdo para representar uma altura de vôo, ficando apenas uma resposta aceitável.

Neste método a altitude de vôo foi calculada pela equação (6) com base na distância focal estimada e nas coordenadas fotográficas e UTM de dois pares de pontos de apoio localizados nos extremos da fotografia. Foi calculada uma altitude de vôo para cada par de pontos de apoio e posteriormente fez-se uma média. Estes pares de pontos de apoio foram localizados de forma que cruzassem a fotografia nos sentidos de x e de y. A média dos dois resultados foi 2.657,53 m, sendo este valor usado no cálculo das coordenadas deste método.

As coordenadas terrestres planimétricas (X,Y) dos pontos foram calculadas pelas equações (1) em função das altitudes determinadas por paralaxe, distância focal e altitude de vôo. Posteriormente estas coordenadas foram convertidas para o sistema UTM.

3.2.5 Método de Church

O método de Church determina a posição, no sistema UTM, e a atitude da câmara ($E_L, N_L, H_L, t, s, \alpha$) para cada foto individualmente, com base na distância focal e nas coordenadas fotográficas e UTM de três pontos de controle. A posição e a atitude da câmara foram determinadas para as duas fotos, porém os cálculos das coordenadas foram feitos a partir da foto esquerda apenas.

Segundo WOLF (1983) o método de Church é aplicado para fotografias inclinadas, bem como, para fotografias quase verticais. Este método se divide em duas partes, (1) a determinação das coordenadas terrestres da estação de exposição e (2) a determinação dos elementos de orientação angular (*tilt, swing e azimuth*).

Este método parte do princípio básico de que o ângulo espacial formado com o vértice no centro ótico da câmara no momento da exposição fotográfica e dois pontos quaisquer do terreno é o mesmo ângulo formado com o centro ótico da câmara fotográfica e as imagens fotográficas destes mesmos dois pontos, independentemente da posição espacial em que se encontra a câmara fotográfica, isto é, se a câmara estava ou não inclinada no momento da exposição.

O método de Church é um procedimento iterativo que calcula os acréscimos que devem ser aplicados às respectivas coordenadas terrestres X,Y,Z para o ponto L (posição da objetiva da câmara no instante da tomada da foto). Estima-se os valores iniciais dessas coordenadas e repete-se as iterações até que os acréscimos sejam desprezíveis. Posteriormente, determina-se as coordenadas fotográficas do ponto n (ponto nadiral). Por fim determina-se o ângulo "t" (*tilt*) e "s" (*swing*), todos estes elementos estão representados na figura 4.

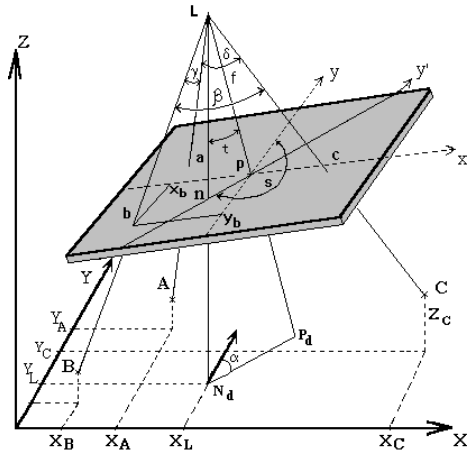


Fig. 4 : Elementos do método de Church (RIBEIRO, 1995)

Na figura 4 os pontos de controle A, B e C no terreno têm suas imagens correspondentes a, b e c numa fotografia inclinada. Os ângulos γ, δ e β têm vértices em L e são formados pelos raios LA, LB e LC. Pela geometria, os cossenos destes ângulos são expressos nas equações (7).

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{(X_L - X_A)(X_L - X_B) + (Y_L - Y_A)(Y_L - Y_B) + (Z_L - Z_A)(Z_L - Z_B)}{(LA)(LB)} \\ \cos \beta &= \frac{(X_L - X_B)(X_L - X_C) + (Y_L - Y_B)(Y_L - Y_C) + (Z_L - Z_B)(Z_L - Z_C)}{(LB)(LC)} \\ \cos \delta &= \frac{(X_L - X_A)(X_L - X_C) + (Y_L - Y_A)(Y_L - Y_C) + (Z_L - Z_A)(Z_L - Z_C)}{(LA)(LC)} \end{aligned} \quad (7)$$

Nas equações (7) os Xs, Ys, e Zs são coordenadas terrestres dos pontos de controle A, B e C em metros. E LA, LB e LC são os comprimentos dos raios da estação de exposição até os respectivos pontos de controle em metros.

Os cossenos dos ângulos γ, δ e β também podem ser expressos em função da distância focal e das coordenadas fotográficas dos pontos imagem a, b e c.

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{x_a x_b + y_a y_b + f^2}{(La)(Lb)} \\ \cos \beta &= \frac{x_b x_c + y_b y_c + f^2}{(Lb)(Lc)} \\ \cos \delta &= \frac{x_a x_c + y_a y_c + f^2}{(La)(Lc)} \end{aligned} \quad (8)$$

Nas equações (8) os x's e y's são as coordenadas fotográficas das imagens dos pontos de controle a, b e c; f é a distância focal e La, Lb e Lc são o comprimento da estação de exposição até os pontos imagem respectivos, este elemento é calculado a partir das coordenadas fotográficas do ponto e da distância focal, como mostrado na equação (9) para um ponto qualquer (q).

$$Lq = \sqrt{x_q^2 + y_q^2 + f^2} \quad (9)$$

Calculados os cossenos de γ, δ e β pelas equações (8), as equações (7) ficam apenas com três elementos desconhecidos: X_L, Y_L e Z_L . Estas equações podem ser resolvidas simultaneamente para determinar a posição espacial da fotografia inclinada. Porém as equações (7) são não-lineares e devem ser linearizadas. WOLF (1983) usa o teorema de Taylor para esta linearização. Valores iniciais X_{L0}, Y_{L0} e Z_{L0} são estimados para as coordenadas da estação de exposição desconhecida, e correções dX_L, dY_L e dZ_L para serem adicionadas às estimativas iniciais são calculadas. Aplicando o teorema de Taylor nas equações (7) são obtidas as equações (10) linearizadas.

$$\begin{aligned} K_1 &= a_{11}dX_L + a_{12}dY_L + a_{13}dZ_L \\ K_2 &= a_{21}dX_L + a_{22}dY_L + a_{23}dZ_L \\ K_3 &= a_{31}dX_L + a_{32}dY_L + a_{33}dZ_L \end{aligned} \quad (10)$$

As equações (10) são resolvidas para se obter as correções dX_L, dY_L e dZ_L . Essas correções são adicionadas aos valores iniciais estimados X_{L0}, Y_{L0} e Z_{L0} para melhorar as estimativas, e o procedimento é repetido até que as correções tornem-se insignificantes.

Após a primeira parte do método de Church ter se completado, os elementos angulares restantes podem ser determinados. As equações (11) expressam os ângulos nLa, nLb e nLc da figura 4 em função das coordenadas fotográficas x_n e y_n do ponto nadiral, dos pontos de controle e da distância focal da câmara.

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \cos nLa &= \frac{x_a x_n + y_a y_n + f^2}{(La)(Ln)} \\ \text{(b)} \quad \cos nLb &= \frac{x_b x_n + y_b y_n + f^2}{(Lb)(Ln)} \\ \text{(c)} \quad \cos nLc &= \frac{x_c x_n + y_c y_n + f^2}{(Lc)(Ln)} \end{aligned} \quad (11)$$

Os cosenos das equações (11) também podem ser expressos pelas coordenadas terrestres da estação de exposição e dos pontos de controle como mostrado nas equações (12).

$$\begin{aligned} \cos nLa &= \frac{Z_L - Z_A}{LA} \\ \cos nLb &= \frac{Z_L - Z_B}{LB} \\ \cos nLc &= \frac{Z_L - Z_C}{LC} \end{aligned} \quad (12)$$

Com estes cosenos calculados pelas equações (12) a partir das equações (11) é possível calcular as duas incógnitas (x_n, y_n). Após este cálculo, pode-se determinar os ângulos *tilt*, *swing* e *azimute* mostrados na figura 4. A equação (13) determina o valor do *tilt*.

$$t = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}}{f} \right) \quad (13)$$

O valor do *swing* é calculado a partir das coordenadas fotográficas do ponto nadiral, devendo-se levar em consideração o quadrante em que ele se encontra como mostrado nas equações (14).

$$\begin{aligned} \text{I Quadrante :} \quad s &= \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{y_n} \right) \\ \text{II Quadrante :} \quad s &= 180 - \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{y_n} \right) \\ \text{III Quadrante :} \quad s &= 180 + \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{y_n} \right) \\ \text{IV Quadrante :} \quad s &= 360 - \tan^{-1} \left(\frac{x_n}{y_n} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

A equação (15) expressa o cálculo do azimute, que requer as coordenadas terrestres do ponto de controle C e da estação de exposição, assim como as fotocoordenadas do ponto de controle C no sistema de coordenadas auxiliares para fotos oblíquas.

$$\alpha = \left[\tan^{-1} \left(\frac{X_C - X_L}{Y_C - Y_L} \right) \right] - \left[\tan^{-1} \left(\frac{x'_c}{y'_c \cos t} \right) \right] \quad (15)$$

Os elementos de orientação exterior foram calculados com vários trios de pontos de controle, sendo escolhido um dos resultados para dar seqüência aos cálculos das coordenadas. Esta escolha foi feita com base na melhor conformação geométrica do triângulo formado pelos pontos de controle em relação ao ponto principal de cada foto.. O Quadro 1 apresenta os elementos de orientação exterior obtidos. O azimute não é apresentado neste quadro por não ser necessário para os cálculos posteriores, mas as coordenadas fotográficas do ponto nadiral (x_n, y_n) possibilitam a determinação do azimute.

Quadro 1 – Elementos de orientação exterior pelo método de Church

ELEMENTOS	FOTO ESQUERDA	FOTO DIREITA
E _L	723.186,60 m	724.043,59 m
N _L	7.703.081,93 m	7.703.294,60 m
H _L	2.643,24 m	2.654,50 m
t (tilt)	3,080°	4,009°
s (swing)	342,608°	341,224°
x _n (ponto nadiral)	-3,19 mm	-4,47 mm
y _n (ponto nadiral)	10,17 mm	13,14 mm

Uma vez determinados os elementos de orientação exterior foram calculadas as altitudes dos pontos através da equação de paralaxe, sendo usado como altitude de voo o elemento H_L de 2.643,24m obtida para a foto da esquerda.

WOLF (1983) afirma que erros em medidas de paralaxe devido à fotografias inclinadas, imperfeição no alinhamento das fotos para as medidas de paralaxe, encolhimento ou expansão do papel fotográfico e distorção das lentes da câmara podem ser compensados por um gráfico de correção de paralaxe. RIBEIRO (1996) cita que as altitudes de pontos da fotografia que foram determinadas pelo processo da barra de paralaxe, podem ser corrigidas através de métodos analíticos de interpolação. Todos os métodos analíticos e gráficos são baseados em alguns pontos de controle com suas altitudes medidas no campo. Dois métodos de interpolação foram usados: interpolação por Mc Dougall e interpolação linear dupla.

A interpolação de Mc Dougall, equação (16) (Mc Dougall, 1976 citado por ALVES, 1982), baseia-se nas coordenadas fotográficas, para determinar a distância entre os pontos, e nas altitudes de pontos de controle para calcular a correção da altitude de um ponto qualquer. Esta interpolação foi empregada usando-se 4 e 6 pontos de controle para a escolha do melhor resultado.

$$C_Q = \frac{\sum \frac{C_i}{d_{iQ}^2}}{\sum \frac{1}{d_{iQ}^2}} \quad (16)$$

em que

C_Q - correção num ponto qualquer

C_i - correção no ponto de controle i

d_{iQ} - distância entre o ponto de controle i e o ponto Q

Segundo RIBEIRO (1996) no método de interpolação linear dupla quatro pontos de controle são interpolados aos pares, gerando dois coeficientes de correção. Em cada ponto que se deseja corrigir a altitude é feita uma nova interpolação tendo como base tais coeficientes de correção, conforme ilustrado pela figura 5.

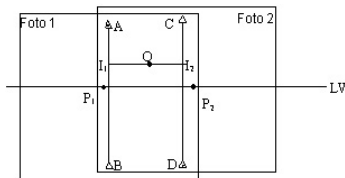


Fig. 5 : Posição dos pontos de controle e do ponto qualquer Q, na interpolação linear dupla.

A Figura 5 mostra o esquema da interpolação linear dupla na área de superposição de duas fotografias sucessivas, onde:

- P₁ e P₂ são os pontos principais das fotos 1 e 2 sucessivamente;
- LV é a linha de vôo;
- A, B, C e D são pontos de controle;
- Q é um ponto qualquer que se deseja corrigir a altura;
- I₁ e I₂ são interpolações provenientes de AB e CD respectivamente.

A interpolação linear dupla é descrita pelas equações (17), (18) e (19) baseando-se na distância entre os pontos e nas altitudes de quatro pontos de controle. E as variáveis apresentadas são:

- C_A, C_B, C_C e C_D são as correções para os pontos de controle A,B,C e D respectivamente;
- d é a distância entre dois pontos;
- K₁ e K₂ são coeficientes de interpolação para os pontos AB e CD respectivamente;
- Cl₁ e Cl₂ são as correções da interpolação 1 e 2 respectivamente;
- C_Q é a correção num ponto qualquer Q.

$$K_1 = \frac{C_B - C_A}{d_{AB}}$$

$$K_2 = \frac{C_D - C_C}{d_{CD}} \quad (17)$$

Nas equações (18) substitui-se as variáveis K₁ e K₂ pelos valores obtidos nas equações (17).

$$\begin{aligned} Cl_1 &= C_A + K_1 * d_{I_1 A} \\ Cl_2 &= C_C + K_2 * d_{I_2 C} \end{aligned} \quad (18)$$

Na equação (19), para a determinação de C_Q, as variáveis Cl₁ e Cl₂ são substituídas pelos valores calculados nas equações (18).

$$C_Q = Cl_1 + \frac{Cl_2 - Cl_1}{d_{I_1 I_2}} * d_{I_1 Q} \quad (19)$$

No cálculo das altitudes a interpolação de Mc Dougall, utilizando 6 pontos de controle, foi aquela que apresentou menores valores de erros para a maioria dos pontos. Esta obteve o menor RMSE, seguida da Mc Dougall com 4 pontos de controle e por último a interpolação linear dupla, sendo os três valores de RMSE muito próximos um do outro.

A determinação das coordenadas planimétricas (X,Y) dos pontos foi através das equações (1) usando os elementos de orientação exterior determinados anteriormente; as coordenadas fotográficas e a distância focal. Usando quatro pontos de controle as coordenadas eram transformadas para o sistema UTM (E,N). Dois pontos ajustaram a escala numa direção e outros dois pontos ajustaram na outra, sendo feito a média dos fatores de escala. Estes cálculos foram executados em planilha eletrônica.

3.2.6 Método das equações de colinearidade

Segundo WONG (1980) e WOLF (1983) as equações de condição de colinearidade são as duas equações fundamentais mais úteis da fotogrametria analítica. Estas são derivadas da equação de transformação projetiva a qual é baseada na consideração fundamental de que o centro de exposição, o ponto no campo e seu ponto imagem correspondente, todos estão sobre uma mesma linha reta. Estas duas equações juntas descrevem a orientação absoluta dos raios luminosos que atravessam a objetiva da câmara no momento da tomada da foto. A localização do ponto Q (ponto qualquer) no campo e a posição da imagem do ponto q na fotografia são mostrados na Figura 6.

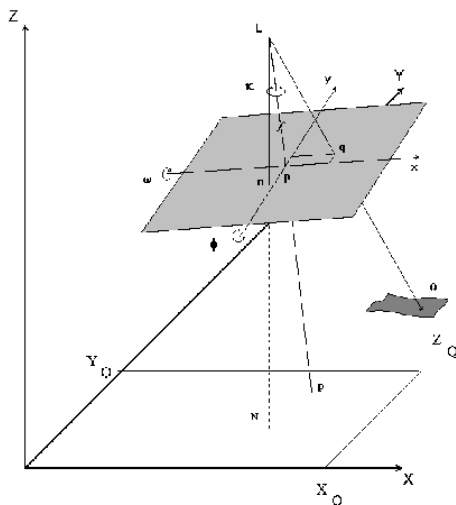


Fig. 6 : Elementos das equações de condição de colinearidade (RIBEIRO, 1995).

As equações de condição de colinearidade são descritas pelas equações (20) e podem ser usadas para resolver uma extensa variedade de problemas da fotogrametria. Desde que cada raio luminoso possa ser descrito por estas duas equações, um modelo matemático completo de raios formando um modelo fotogramétrico pode ser construído.

$$x_q = -f \frac{m_{11}(X_Q - X_L) + m_{12}(Y_Q - Y_L) + m_{13}(Z_Q - Z_L)}{m_{31}(X_Q - X_L) + m_{32}(Y_Q - Y_L) + m_{33}(Z_Q - Z_L)} \quad (20)$$

$$y_q = -f \frac{m_{21}(X_Q - X_L) + m_{22}(Y_Q - Y_L) + m_{23}(Z_Q - Z_L)}{m_{31}(X_Q - X_L) + m_{32}(Y_Q - Y_L) + m_{33}(Z_Q - Z_L)}$$

em que

x_q e y_q - coordenadas de foto da imagem do ponto Q;

f - distância focal da câmara;

X_Q , Y_Q e Z_Q - coordenadas de campo do ponto Q;

X_L , Y_L e Z_L - coordenadas de campo do centro de exposição da foto L;

m_{ij} - são função dos três parâmetros de rotação (ω , ϕ e κ).

As equações (20) não são lineares e envolvem nove elementos desconhecidos, os três ângulos de rotação (inseridos nos m 's), as coordenadas terrestres (X,Y,Z) da estação de exposição, e do ponto Q. Segundo WOLF (1983) esta linearização é feita pelo método diferencial de Taylor e posteriormente é usado o ajustamento de observações para se obter uma solução ótima para os dados calculados.

$$v_{xq} = b_{11\omega} + b_{12\phi} + b_{13\kappa} - b_{14\omega} X_L - b_{15\phi} Y_L - b_{16\phi} Z_L + b_{14\omega} X_Q + b_{15\phi} Y_Q + b_{16\phi} Z_Q + J \quad (21)$$

$$v_{yq} = b_{21\omega} + b_{22\phi} + b_{23\kappa} - b_{24\omega} X_L - b_{25\phi} Y_L - b_{26\phi} Z_L + b_{24\omega} X_Q + b_{25\phi} Y_Q + b_{26\phi} Z_Q + K$$

Este é um processo iterativo em que se monta repetidamente as equações (21), usando pontos de controle determinados no campo para substituir as incógnitas X_Q , Y_Q e Z_Q , ficando apenas seis elementos desconhecidos, onde obtendo-se os acréscimos $\partial \omega$, $\partial \phi$, $\partial \kappa$, ∂X_L , ∂Y_L e ∂Z_L que alterando os valores iniciais das variáveis da atitude da câmara proporcionam novas equações (21) Esta operação se repete até que os acréscimos tornem-se insignificantes, obtendo-se finalmente os valores da posição e altitude da câmara X_L , Y_L , Z_L , ω , ϕ , κ .

Com 3 pontos de apoio bem escolhidos (Q_1 , Q_2 , Q_3) monta-se 6 equações, obtendo-se apenas uma solução para as equações (21). Se forem utilizados mais que 3 pontos de apoio, aplica-se o método dos mínimos quadrados, resultando numa solução ótima para as 6 incógnitas de uma foto:

$$\partial X_L, \partial Y_L, \partial Z_L, \partial \kappa, \partial \phi, \partial \omega$$

Os termos $b_{14\omega} X_Q$, $b_{15\phi} Y_Q$, $b_{16\phi} Z_Q$, $b_{24\omega} X_Q$, $b_{25\phi} Y_Q$ e $b_{26\phi} Z_Q$ são anulados nas equações (21), pois não contém derivadas de incógnitas, mas sim de coordenadas conhecidas X, Y e Z de pontos de controle.

Se as duas equações de colinearidade forem aplicadas às duas fotos sucessivas, obtêm-se então os valores X_L , Y_L , Z_L , κ , ϕ , ω para cada uma das fotos.

Para um ponto Q de coordenadas terrestres (X_Q , Y_Q , Z_Q) desconhecidas, mas que apareça nestas duas fotos de atitude e posição já definidas, pode-se montar as equações (22) para cada foto, onde apenas as coordenadas de Q são incógnitas:

$$v_{xq} = b_{14} \partial X_Q + b_{15} \partial Y_Q + b_{16} \partial Z_Q + J \quad (22)$$

$$v_{yq} = b_{24} \partial X_Q + b_{25} \partial Y_Q + b_{26} \partial Z_Q + K$$

Como as incógnitas nestas duas equações são X_Q , Y_Q e Z_Q , tem-se, então 3 incógnitas e 4 equações, que pelo método dos mínimos quadrados produz a melhor solução.

Também neste caso tem-se um procedimento iterativo, onde através do ajustamento das observações, por aproximações sucessivas chega-se aos valores procurados X_Q , Y_Q , Z_Q .

As equações foram programadas em linguagem computacional em duas etapas:

- 1- Determinação da atitude e posição da câmara para cada fotografia;
- 2- Determinação das coordenadas UTM dos pontos.

A determinação dos elementos de orientação exterior da câmara é feita para cada fotografia com base nas coordenadas fotográficas e UTM de pontos de controle (mínimo 3 e máximo 7 para o programa desenvolvido), sendo necessário ainda inserir valores iniciais para os elementos E_L , N_L , H_L , ω , ϕ , κ , que determinam a posição e altitude da câmara. A partir dos valores iniciais o programa fez iterações até que as correções passassem a ter valores inferiores à 0,00001 m para as posições e 0,000001° para os ângulos. Esta etapa foi realizada em uma foto de cada vez.

Quadro 2 – Elementos de orientação exterior das fotografias determinadas pelo método de colinearidade com tolerância de 0,000001° e 0,00001 m para as iterações κ , ϕ , ω - ângulos de rotação em torno dos eixos z,y,x respectivamente
 E_L , N_L , H_L – coordenadas UTM e altitude da estação de exposição

ELEMENTOS	FOTO ESQUERDA	FOTO DIREITA
n° de iterações	2.715	3.884
κ	12,22762°	12,57945°
ϕ	-2,28817°	-1,41473°
ω	-2,23390°	-3,26863°
E_L (m)	723159,420	724068,873
N_L (m)	7703064,052	7703289,839
H_L (m)	2636,451	2650,004

As coordenadas UTM dos pontos foram geradas numa segunda etapa baseada nos elementos de orientação exterior, calculados anteriormente, e nas coordenadas fotográficas dos pontos para cada foto, além de um valor inicial para as coordenadas UTM (usou-se as coordenadas considerando a foto vertical). Nesta etapa trabalhou-se com os dados das duas fotos simultaneamente. As iterações foram feitas até que as correções fossem inferiores à 0,00001m, sendo colocado 4000 como número máximo de iterações.

3.2.7 Verificação da Exatidão

A verificação da exatidão de um mapa é baseada nas coordenadas verdadeiras de pontos no terreno que tenham seus homólogos representados na carta. Estas coordenadas verdadeiras devem ter sido medidas no campo por um processo mais preciso que o de confecção do mapa, como a topografia convencional e os receptores GPS geodésicos ou topográficos no modo diferencial, dependendo da escala do mapa em questão. A exatidão dos pontos de controle deve estar em torno de $\pm 0,1$ m, ou menos para trabalhos mais precisos como medidas cadastrais e entre $\pm 0,3$ m à $\pm 2,0$ m para mapeamentos fotogramétricos em geral, ou tolerância até maior para mapeamentos em médias e pequenas escalas (HENRIKSEN et al., 1980).

Para todos os métodos usados foi determinado o erro para as coordenadas (E, N, Z) de cada ponto subtraindo-se o valor de campo do valor calculado no método analisado. O Erro Médio Quadrático ou RMSE (Root Mean Square Error) foi calculado para cada componente da coordenada em cada método através da equação (23). Os pontos usados como pontos de controle no método analisado não entram no cálculo do RMSE.

$$EMQ = RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n erro_i^2}{n}} \quad (23)$$

onde,

EMQ – Erro Médio Quadrático

RMSE – Root Mean Square Error

erro_i – erro individual do elemento i

n – número total de elementos envolvidos

O quadro 3 apresenta o erro planimétrico e altimétrico para todos os três métodos usados, sendo os pontos apresentados aqueles que não entraram no apoio de campo. Os erros em cada ponto podem estar relacionados à: localização do ponto na fotografia (objetos nas áreas extremas da foto sofrem maiores deslocamentos), localização do ponto no terreno (pontos de maior altitude sofrem maiores deslocamentos) e falta de nitidez na determinação do ponto na fotografia.

Quadro 3 - Erros planimétricos e altimétricos para os métodos estudados

Ponto	FOTO VERTICAL		CHURCH		COLINEARIDADE	
	EN (m)	Z (m)	EN (m)	Z (m)	EN (m)	Z (m)
10	2,79	35.17	1,23	17.59	1,62	9.94
11	3,55	15.71	4,94	5.47	0,26	7.44
12	22,74	38.05	3,48	12.3	1,22	1.09
13	2,31	32.61	5,08	16.08	3,12	7.63
14	6,44	-8.01	3,83	-5.03	2,11	6.42
15	3,78	29.3	2,79	9.44	1,47	7.26
16	7,85	16.49	3,85	12.58	4,05	10.7
17	2,25	17.64	3,93	13.05	1,36	2.02
18	10,21	12.13	3,49	9.59	1,12	7.93
19	7,61	-9.42	4,43	-9.54	1,22	2.44
20	3,31	-0.31	4,95	-0.5	2,31	-1.73
21	5,56	9.59	8,07	6.01	3,58	6.91
22	7,74	-1.32	2,48	-1.06	2,37	2.41
23	10,75	-4.14	0,66	-2.38	5,10	2.21
24	13,54	28.28	7,56	8.28	9,82	-7.25
26	16,69	18.75	8,04	1.35	5,72	0.24
30	7,95	-3.29	7,35	-0.32	4,63	8.06
31	7,28	-3.23	5,36	-0.43	3,44	6.33
RMSE	9,50	18.45	5,00	8.82	3,75	6.42

Pelo quadro acima observa-se que a maioria dos erros altimétricos são superiores aos erros planimétricos, mesmo no método de colinearidade que não usou barra de paralaxe.

A figura 7 mostra os erros planimétricos e a figura 8 os altimétricos para cada ponto em cada método expressos num gráfico.

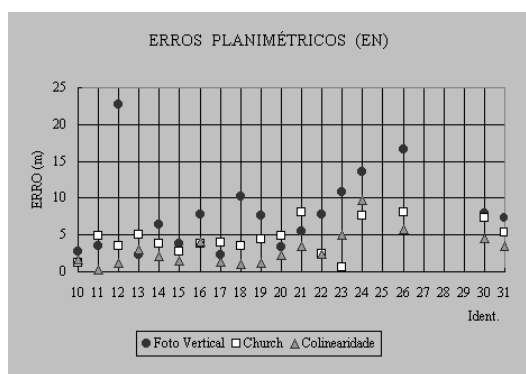


Fig. 7 : Erros planimétricos para os 3 métodos analisados.

De acordo com o gráfico de erros planimétricos (figura 7), estes não ultrapassam 25m para nenhum dos métodos, estando apenas 5 dos pontos com erros superiores à 10m, e todos estes no método que considerou a foto como vertical.

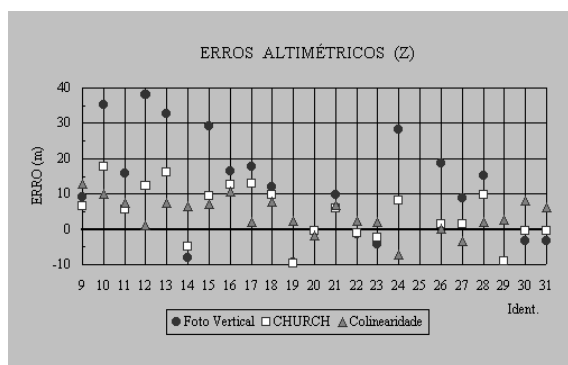


Fig. 8 : Erros altimétricos para os 3 métodos analisados.

O gráfico de erros (figura 8) altimétricos mostra que nos métodos de Church e Colinearidade os erros não ultrapassaram 20 e 15m respectivamente.

3.2.8 Padrão de Exatidão Cartográfica

Segundo a COMISSÃO DE CARTOGRAFIA (1985) o decreto n.º 89.817, de 20 de junho de 1984, publicado no Diário Oficial da União estabelece as Instruções Reguladoras de Normas Técnicas da Cartografia Nacional. O capítulo II, deste decreto, seção 1 normatiza a classificação de uma carta quanto à exatidão, como descrito a seguir:

"Art. 8º - As cartas quanto à exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, segundo o critério abaixo indicado:

1. - Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrico – estabelecido.
2. - Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfico – Altimétrico – estabelecido.

§ 1.º – Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo à 90% da probabilidade, que define a exatidão dos trabalhos cartográficos.

§ 2.º – A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão – PEC = 1,6449 EP.

§ 3.º – O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§ 4.º – Para efeito das presentes instruções consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático."

A seção 2 do mesmo decreto nos artigos 9º e 10, estabelece as classes das cartas segundo sua exatidão.

"Art. 9.º – As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

a – Classe A

1 – Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 – Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas de nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

b – Classe B

1 – Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrico: 0,8 mm, na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 – Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas de nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

c – Classe C

1 – Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrico: 1,0 mm, na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 – Padrão de Exatidão Cartográfica – Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas de nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Art. 10 – É obrigatória a indicação da Classe no rodapé da folha, ficando o produtor responsável pela fidelidade da classificação.

Parágrafo Único – Os documentos cartográficos, não enquadrados nas classes especificadas no artigo anterior, devem conter no rodapé da folha a indicação obrigatória do Erro-Padrão verificado no processo de elaboração."

O Decreto, citado acima, serviu de base para a classificação dos métodos quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC. Uma vez que o referido decreto não especifica o número de pontos para teste, procurou-se seguir a quantidade sugerida por HENRIKSEN et al. (1980) que é de no mínimo 20 pontos por teste. Para a verificação da exatidão e classificação dos métodos escolheu-se os pontos de apoio que não foram usados como pontos de controles, sendo 18 na planimetria e 22 na altimetria, ficando a planimetria com número de pontos 10% aquém do sugerido por HENRIKSEN et al. (1980).

O Quadro 4 apresenta os elementos usados e a classificação de cada método para um produto final na escala 1:10.000.

Quadro 4 – Classificação dos métodos segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica

Crítérios	Foto Vertical	Church	Colinearidade	
maior erro planimétrico de 90% dos pontos (m)	13,54	7,56	5,10	
Erro-Padrão planimétrico	9,50	5,00	3,75	
maior erro altimétrico de 90% dos pontos (m)	32,61	13,05	9,94	
Erro-Padrão altimétrico	18,45	8,82	6,42	
CLASSE	*	B	C	B
equidistância permitida entre curvas de nível (m)	-	22	18	17
			14	

* Não há classe correspondente

As avaliações foram feitas com base apenas no pequeno número de pontos de apoio, ficando pequena a amostra para classificação. O mais indicado seria levantar uma quantidade grande de pontos de controle para uma maior fidelidade dos resultados.

O método de colinearidade atendeu a exigência de duas classes: B e C com curvas de nível equidistantes de 17 e 14 m respectivamente. O método de Church também foi classificado nas classes B e C com curvas de nível equidistantes de 22 e 18 m respectivamente. Equanto o método considerando a foto vertical não se enquadrou nas classes apresentadas.

4 Conclusões e Recomendações

Com base no processo de trabalho e nos resultados obtidos conclui-se que:

- Considerando apenas os pontos de apoio testados, o material fotográfico corrigido pelos métodos das equações de Colinearidade e Church, visando um produto final na escala 1:10.000, comportou-se satisfatoriamente quanto aos Padrões de Exatidão Cartográfica, sendo o resultado classificado nas classes B e C.

- Os resultados apresentados mostram-se satisfatórios para trabalhos de atualização cartográfica, uma vez que, na maior parte dos casos, a altimetria (curvas de nível, pontos cotados,...) não sofre mudanças significativas, podendo esta ser obtida de outros mapeamentos, sendo estas fotos utilizadas apenas na atualização da planimetria.

- O material e método usados possibilitam confecção de base cartográfica em escala 1:10.000 e menores, tomando-se os devidos cuidados quanto à altimetria e exatidão requerida. Quando menor a escala, melhor a exatidão cartográfica da base gerada usando tais fotografias.

- O método de correção considerando a foto vertical não atingiu as classes do Padrão de Exatidão Cartográfico, não sendo impedido de ser usado desde que, contenha no rodapé do material produzido a indicação obrigatória do Erro-Padrão verificado no processo de elaboração.

- A correção através do método das equações de colinearidade apresentou a melhor exatidão planimétrica e altimétrica. Este método mostrou-se mais vantajoso, pois não necessita de leituras de paralaxe, minimizando fontes de erro e tempo gasto no processo, sendo possível aplicá-lo para uma grande quantidade de pontos em diversos pares estereoscópicos. O processamento através deste método permite fazer o ajustamento das observações na determinação dos elementos de orientação exterior e das coordenadas plani-altimétricas dos pontos, o que significa uma solução ótima para os elementos calculados. E é o único método, dos três apresentados, que num só processo calcula as três componentes das coordenadas dos pontos E, N e Z ou H.

- O uso combinado do GPS topográfico e da Estação Total no levantamento dos pontos de apoio resultou num trabalho de campo satisfatório.

À luz dos resultados obtidos recomenda-se para os trabalhos futuros:

- A calibração da câmara fotogramétrica a fim de se obter melhores resultados.

- Fazer cópias fotográficas em condições apropriadas para que no ato da ampliação não sejam introduzidos novos erros.

- Repetir este estudo com vários pares de fotografias e uma densa rede de pontos de apoio para uma análise mais ampla.

- Migrar todo o processo para o formato digital, desde as fotografias até a geração do produto final.

5 Referências Bibliográficas

ALVES, L.M. **Construção de modelos em perspectiva por meio da digitalização de mapas topográficos**. Viçosa, MG: UFV, 1982. 64p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, 1982.

COMISSÃO DE CARTOGRAFIA. **Cartografia e aerolevanteamento – legislação**. Brasília: IBGE, 1985. 251p. (Separata).

DISPERATI, A. A. **Obtenção e uso de fotografias aéreas de pequeno formato**. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 1991. 290p.

GISIGER, A., COOPER, E. S., YAN Y., LIMP, W. F. **Development and implementation of a rapid low-cost photogrammetric data archival system for artifact and osteological inventory**. Fayetteville, Arkansas: University of Arkansas, 1996. 86p. (Internet).

HENRIKSEN, S. W., SCHROEDER, S. H., BREWER, R. K. Field Surveys for photogrammetry. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY **Manual of photogrammetry**. 4. ed. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry, 1980. p. 413-452.

IBGE. **A DGC no contexto do IBGE – plano de trabalho 1996**. Rio de Janeiro, 1996. 12p.

KÖLBL, O. R. Metric or non-metric cameras. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 42, n.1, p. 103-113, 1976.

LILLESAND, T. M., KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. New York: Wiley & Sons, 1994. 779p.

O BRASIL precisa de mapas. **Fator GIS: A Revista do Geoprocessamento**. n. 10, p 10-14, 1995.

OLIVEIRA, C. **Dicionário cartográfico**. 2. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: IBGE, 1983. 781p.

RIBEIRO, J. C. **Princípios gerais de fotogrametria, fotointerpretação e sensoriamento remoto**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 117p. (Notas de aula da disciplina ENF 310).

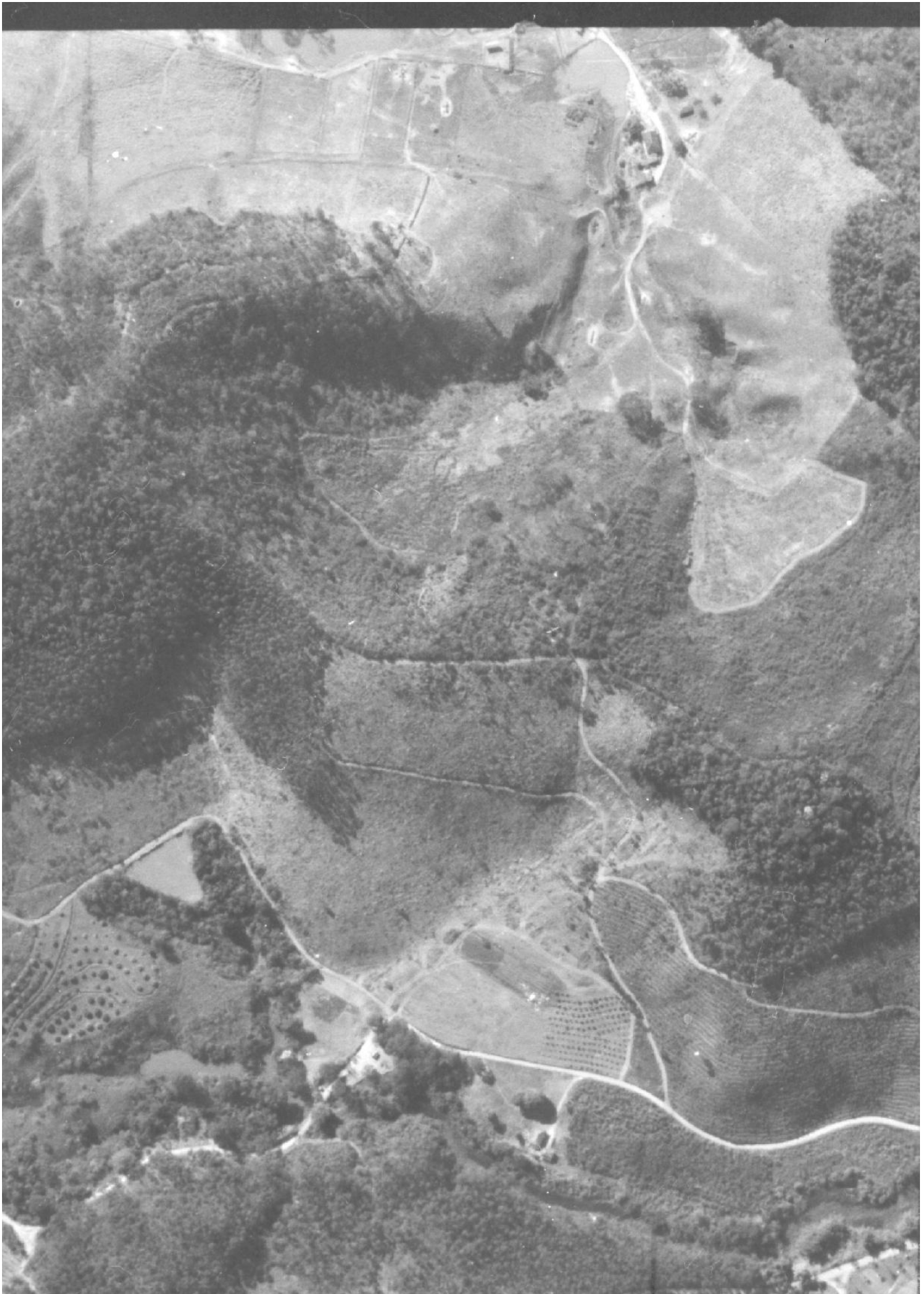
RIBEIRO, J. C. **Interpolação linear dupla para correção de altitudes**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1996. np. (Manuscrito; Roteiro de aula prática da disciplina ENF 310).

WARNER, W. S., GRAHAM, R. W., READ R.E. **Small format aerial photography**. Scotland: Whittles, 1996. 348p.

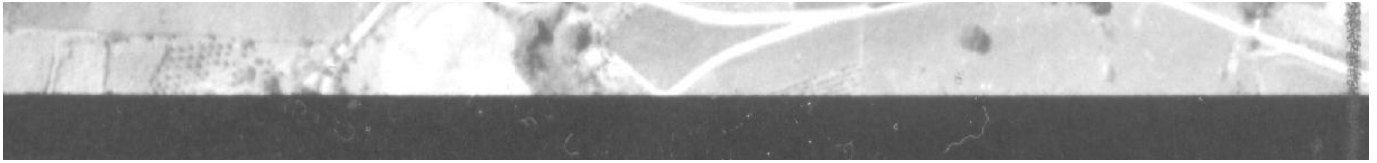
WOLF, P. R. **Elements of photogrammetry**. 2. ed. Singapore: Mc Graw-Hill Book Company, 1983. 628p.

Subsídios para Obtenção e Atualização de Base Cartográfica a partir de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato

MS Luciana Suaid Tomazi Vasco · Prof. MS José Carlos Ribeiro







oberta pela região de estereoscopia das fotografias

