
TOLERÂNCIA DA ORIENTAÇÃO ABSOLUTA

I — INTRODUÇÃO

A preocupação fundamental do engenheiro na construção de uma carta é a obtenção da representação planoaltimétrica do terreno que atenda às prescrições de acuracidade aplicáveis às finalidades da mesma. Esta preocupação deve se fazer presente em cada fase do mapeamento, de forma que não seja comprometido o produto final, ou ainda que o excesso de erro numa determinada etapa não force outra a tentar alcançar um resultado além de suas reais possibilidades.

Dentro desta idéia, procuraremos aqui estabelecer o processo para determinar as tolerâncias admissíveis na orientação absoluta, vale dizer no nivelamento e colocação em escala dos modelos estereoscópicos.

A escolha deste tema prende-se ao fato que a orientação absoluta é uma fase crítica do mapeamento fotogramétrico, no sentido que o restituidor muitas vezes se depara com dificuldades para realizá-la, cabendo ao engenheiro decidir qual o procedimento a adotar.

Em geral, essa decisão parece partir da premissa que qualquer ajustamento no modelo que satisfaça às con-

Eng.º Dinarte Francisco P. N.
de Andrade
Do Centro de Operações Cartográficas
— D S G

dições topológicas é aceitável, o que em situações extremas pode conduzir a distorções consideráveis da verdade cartográfica pretendida.

II — ESPECIFICAÇÕES DE ACURACIDADE DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS

Procurando dar um sentido prático imediato à presente exposição, optamos por adotar, a título de exemplo, as especificações fornecidas pelo "Bureau of the Budget" dos EUA, que estabelecem os "U.S. National Map Accuracy Standards", usados para o mapeamento doméstico daquele país e também observados por outros países, inclusive o Brasil, e que abaixo se seguem:

a. Elementos planimétricos:

90% dos elementos bem definidos, como interseção de caminhos, marcos trigonométricos, cantos de grandes edifícios, etc., com exceção daqueles que estejam inevitavelmente deslocados pelo uso de convenções cartográficas, devem estar posicionados com erro inferior a 0,5mm para escalas de 1:20.000 ou menores, e 0,8mm para as supe-

riores a 1:20.000, em relação ao quadriculado da carta.

b. Elementos altimétricos:

(1) 90% das curvas de nível e pontos com cotas interpoladas devem ter erro inferior a 1/2 eqüidistância, sendo que no erro total de qualquer ponto pode ser admitida uma parcela devida ao deslocamento horizontal dentro da tolerância respectiva.

(2) 90% dos pontos cotados devem ter erro inferior a 1/4 da eqüidistância. (2-pa.5, 1-pa.1182 e 6-pa.1-3).

Cabe fazermos a seguinte observação, que servirá para melhor definirmos o equacionamento do problema: as especificações acima referem-se à acuracidade relativa da carta e não à absoluta (4-pa.11 e seguintes). Realmente, a posição de pontos é testada sem serem levados em consideração os erros provenientes da triangulação básica e da rede de nivelamento de 1.^a Ordem, comuns à carta como um todo. Em nosso estudo, portanto, consideraremos apenas os erros cometidos a partir da determinação do apoio suplementar.

III — ERRO MÉDIO QUADRÁTICO TOTAL ADMISSÍVEL

O nível de probabilidade de 90% pode ser convertido para o nível de 68,27%, correspondente ao desvio padrão, ou erro médio quadrático, pelo fator de conversão 1,6449(3-pa.8 e 2-pa.6). Ainda que na realidade a distribuição dos erros de posicionamento horizontal não seja linear, devido aos componentes em X e Y das coordenadas (2-pa.6 e 4-pa.6), podemos assim considerá-la, com suficiente aproximação (2-pa.6, 7 e 8), facilitando o tratamento geral na planimetria e altimetria.

Teremos então:

a. Desvio padrão planimétrico:

$$(1) \text{ Escalas 1:20.000 ou menores} \\ \tau_p = 0,5\text{mm}/1,6449 = 0,3\text{mm}$$

$$(2) \text{ Escalas maiores que 1:20.000} \\ \tau_p = 0,8\text{mm}/1,6449 = 0,5\text{mm}$$

b. Desvio padrão altimétrico:

$$(1) \text{ Curvas de nível e pontos interpolados} \\ \tau_h = 0,5\text{Eq}/1,6449 = 0,3\text{Eq}$$

$$(2) \text{ Pontos cotados} \\ \tau_h = 0,25\text{Eq}/1,6449 = 0,15\text{Eq}$$

IV — ERRO MÉDIO QUADRÁTICO TOTAL ESPERADO

Supondo-se que a construção da

carta sofra uma propagação linear de erros, atribuídos a cada uma de suas fases independentemente (2-pa.9), podemos obter expressões que nos darão o erro total a esperar. As que abaixo transcrevemos foram apoiadas nas fornecidas em (5) e (2), com algumas modificações que julgamos úteis para os nossos atuais objetivos.

a. Erro total planimétrico:

$$\begin{aligned} \frac{2}{2} \quad \frac{2}{2} \quad \frac{2}{2} \quad \frac{2}{2} \\ M_p = M_{cp} + M_{atp} + M_{oap} \\ + M_r + M_d \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

onde:

M_{cp} ... erro do ponto de campo

M_{atp} ... erro do ajuste de aerotriangulação

M_{oap} ... erro da orientação absoluta

M_r ... erro de restituição

M_d ... erro de desenho final (gravação ou similar)

b. Erro total altimétrico:

$$\begin{aligned} \frac{2}{2} \quad \frac{2}{2} \quad \frac{2}{2} \quad \frac{2}{2} \\ M_h = M_{ch} + M_{ath} + M_{oah} \\ + (M_p \cdot tg\alpha) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

onde:

M_{ch} ... erro do ponto de campo

M_{ath} ... erro do ajuste de aerotriangulação

M_{oah} ... erro de orientação absoluta

α ... inclinação média do terreno

Chamamos atenção para o fato que o aqui definido como "erro de orientação absoluta" não deve ser confundido com o erro assim chamado pelos autores de (2) e (5), o qual comprehende o erro de aerotriangulação. Para nós, M_{oah} , que inclui os componentes devidos aos erros de identificação e o devido às deformações na projeção ou na observação do modelo (5-pa.2 e 2-pa.11), refere-se apenas às operações de orientação propriamente dita.

V — TOLERÂNCIA DAS VÁRIAS FASES DA CONSTRUÇÃO DA CARTA

Apresentamos os seguintes valores, relacionados com as especificações constantes do título II:

a. Planimetria

Apoio de campo:	0,06mm.E
Aerotriangulação:	0,125mm.E
Restituição e desenho final:	0,25mm.E

b. Altimetria

$$0,05\text{Eq}$$

$$0,1\text{Eq}$$

$$0,2\text{Eq}$$

Onde: E ... denominador da escala da carta Eq ... eqüidistância

As especificações acima nos fornecem o erro total:

$$M_p = 0,29.E < 0,3.E \quad \text{mm} \quad \text{mm}$$

$$M_h = 0,23.Eq < 0,3.Eq$$

Elas se referem pois às cartas em escalas de 1:20.000 ou menores, e procuram garantir a acuracidade altimétrica final das curvas de nível (confrontar com os valores do Tit. III).

Para as cartas de escala superior a 1:20.000, a acuracidade planimétrica final exigida é menor, como vimos. Entretanto, isto se deve às maiores dificuldades que então ocorrem no procedimento fotogramétrico. Por esta razão, consideraremos inalterável a tolerância de apoio de campo para qualquer escala.

VI — ESTABELECIMENTO DA TOLERÂNCIA DA ORIENTAÇÃO ABSOLUTA

a. Planimetria

Ao término da orientação absoluta, os erros de desenho ainda não ocorreram. Admitindo-se que os pontos de campo estejam dentro da tolerância estabelecida e que a escala de restituição seja igual à de gravação, fato mais comum e por facilidade do cálculo do exemplo, temos:

$$M_p = \sigma_p \cdot E = 0,3\text{mm.E} \text{ do título III}$$

$$M'_p = \sigma'_p \cdot E = 0,5\text{mm.E} \text{ do título III}$$

$$M_{cp} = 0,06\text{mm.E} \dots \dots \dots \text{do título V}$$

$$M_r = 0,15\text{mm.E} \dots \dots \dots \text{de (2-pa.12)}$$

$$M_d = 0,10\text{mm.E} \dots \dots \dots \text{de (2-pa.13)}$$

Extraindo-se da fórmula (1) o valor de M_{oap} , temos:

$$\begin{aligned} M^2_{oap} = (M^2_{cp} + M^2_{atp} + \\ + M^2_{d}) \cdot E^2 - M^2_{atp} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

onde já introduzimos o fator E por comodidade de expressão. Valorizando-se agora esta última e considerando-se que

$$T_p = M_{oap} \quad \text{vem:}$$

$$T_p = \pm \sqrt{(0,23\text{mm.E})^2 - M^2_{atp}} \quad \text{... para escalas} \leq 1:20.000$$

TOLE RÂNCIA DA ORIENTAÇÃO ABSOLUTA

$$T'p = \pm \sqrt{(0,46 \text{mm.E})^2 - M^2atp} \quad \text{para escalas} > 1:20.000$$

b. Altimetria

Feitas as mesmas considerações acima, e acrescendo-se que os pontos de apoio vertical são **pontos cotados** escolhidos sobre locais planos, a fim de minimizar a influência dos deslocamentos horizontais sobre as medidas altimétricas, e portanto $\operatorname{tg} \alpha = 0$, teremos, extraíndo-se o valor de $Moah$ da fórmula (2):

$$M^2oah = (M^2h - M^2ch) \cdot E^2q - M^2ath \quad \dots \quad (4)$$

onde o fator Eq foi introduzido conforme fizemos na fórmula (3).

Considerando agora os valores:

$$\begin{aligned} Mh &= 0,15 \cdot Eq \quad \text{do título III} \\ Mch &= 0,05 \cdot Eq \quad \text{do título V} \\ &\quad \vdots \\ Th &= Moah \quad \text{vem:} \end{aligned}$$

$$Th = \pm \sqrt{(0,14 \cdot Eq)^2 - M^2ath}$$

VII — CONSIDERAÇÕES FINAIS

Preferimos, na apresentação das tolerâncias, deixar o erro de aerotriangulação como variável. Este procedimento é válido devido principalmente aos constantes aperfeiçoamentos que este processo vem sofrendo. Caso nos tivéssemos fixado nos limites para o erro de aerotriangulação apresentados no título V, teríamos os seguintes resultados:

$$\begin{aligned} Tp &= \pm 0,19 \text{mm.E} \quad \text{escalas} \\ &\quad \leq 1:20.000 \\ T'p &= \pm 0,44 \text{m.E} \quad \text{escalas} \\ &\quad > 1:20.000 \\ Th &= \pm 0,098 \cdot Eq \quad \text{pontos cotados} \end{aligned}$$

Na prática, é mais conveniente trabalhar com o desvio padrão encontrado realmente no ajuste de aerotriangulação, o que poderá aumentar ou diminuir a tolerância da restituição (Tp e Th).

As tolerâncias calculadas devem então ser comparadas com os resultados obtidos ao fim da orientação absoluta. Assim, para a colocação em escala, será permitível uma discrepância de até $2 \cdot Tp$. No nivelamento, o erro médio quadrático das diferenças entre as cotas provenientes da aerotriangulação e as lidas no instrumento deve ser menor que Th . Conforme a predominância dos erros altimétricos ou planimétricos, em função da escala em trabalho, maior atenção deve ser dada aos que tiverem maior influência, e um número maior de pontos deve ser testado para obter-se uma amostra mais significativa do resultado da operação (nivelamento ou escala, conforme o caso). Na prática, isto é limitado pelos pontos disponíveis em cada modelo.

Para finalizar, gostaríamos de demonstrar a consistência dos valores achados acima com as tolerâncias preconizadas nos títulos III e V.

Na fórmula (1), fazendo:

$$Moap = Tp = 0,19 \text{mm.E} \quad \dots \quad \text{título VII}$$

$$\begin{aligned} Matp &= 0,125 \text{mm.E} \quad \dots \quad \text{título V} \\ Mcp &= 0,06 \text{mm.E} \quad \dots \quad \text{título V} \\ Mr &= 0,15 \text{mm.E} \quad \dots \quad (2-\text{pa.12}) \\ Md &= 0,10 \text{mm.E} \quad \dots \quad (2-\text{pa.13}) \end{aligned}$$

obtemos:

$$Mp = \pm 0,3 \text{mm.E} \quad \dots \quad \text{escalas} \\ 1:20.000 \text{ e menores}$$

Na fórmula (2), fazendo:

$$\begin{aligned} Moah &= 0,098 \cdot Eq \quad \dots \quad \text{título VII} \\ Mch &= 0,05 \cdot Eq \quad \dots \quad \text{título V} \\ Math &= 0,10 \cdot Eq \quad \dots \quad \text{título V} \\ \alpha &= 0^\circ \quad \dots \quad \text{pontos cotados} \\ \alpha &= 30^\circ \quad \dots \quad \text{terrenos montanhosos (curvas de nível, etc.)} \end{aligned}$$

obtemos:

$$\begin{aligned} Mh &= 0,15 \cdot Eq \quad \dots \quad \text{pontos cotados} \\ M'h &= 0,23 \cdot Eq \quad \dots \quad \text{curvas de nível} \\ &\quad \text{e pontos interpolados} \end{aligned}$$

A diferença deste último valor com o de $0,3 \cdot Eq$, achado no título III, representa uma folga existente de $0,07 \cdot Eq$ e que é aproveitada pela incerteza humana no desenho das curvas de nível, operação mais subjetiva que a de simplesmente cotar pontos isolados.

1976/JULHO

BIBLIOGRAFIA

1. American Society of Photogrammetry — **MANUAL OF PHOTOGRA MMETRY** — 3.^a edição; Falls Church, Va., E.U.A., 1966.
2. Carvalho, Fernando Rodrigues — **ERROR PREDICTION AND COMPUTATIONS IN PHOTOGRA MMETRIC FLIGHT PLANNING: A THESIS** — The Ohio State University; EUA, 1972.
3. Castello Branco Filho, Moysés — **AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DE UMA CARTA PELO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO** — Diretoria de Serviço Geográfico; Rio de Janeiro, 1968.
4. Greenwalt, Clyde R. — **USERS GUIDE TO UNDERSTANDING CHART & GEODETIC ACCURACIES** — Defense Mapping Agency Aerospace Center; St. Louis Air Force Station, Missouri, EUA, 1971.
5. Notari, José Moura — **SELEÇÃO DE INSTRUMENTOS FOTOGRA MMETRICOS** — Instituto Militar de Engenharia; Rio de Janeiro, 1969.
6. Serviço Geodésico Interamericano (IAGS) — **MANUAL TÉCNICO N.^o 45**, 1968.