

MÉTODOS DE ORTOFOTOGRAFIA

PAULO EURICO DE MELLO TAVARES
Cap. Eng. Geo. — Prof. do IME

A ausência de alguns assuntos mais recentes na bibliografia acessível ao atual aluno da cadeira de fotogrametria, desejo não só de apreender os processos operacionais adequados a determinado aparelho, mas principalmente de conhecer os fundamentos teóricos dos princípios e os métodos em que são baseados, levou-nos a elaborar este trabalho sobre um desses assuntos: "Método de Ortofotografia".

Estamos condensando aqui conclusões a que temos chegado e tópicos extraídos durante estudos, de revistas "Photogrammetric Engineering" da American Society of Photogrammetry e de publicações de simpósios internacionais de ortofotografia. Adicionamos a isso pequenas explicações matemáticas sobre as equações de transformação, baseadas puramente em conceitos da geometria projetiva.

Os métodos e instrumentos de ortofotografia estão em fase de constante evolução e desenvolvimento nos países em que existem empresas fabricantes de instrumental fotogramétrico, onde conseqüentemente o assunto é pesquisado. Esses métodos são relativamente novos pelo menos no campo da aplicação prática, o que faz com que ainda não se tenha adotado um critério definitivo de classificação.

Naturalmente, os critérios estão sempre ligados às considerações de erros residuais, qualidade da imagem e relacionamento entre qualidade e custo da produção da ortofotografia.

Segundo U.V. Helava, uma base bastante segura para classificação dos instrumentos de ortofotografia, intimamente ligada às três considerações acima, é encontrada nas propriedades dimensionais e geométricas da transmissão da imagem da fotografia original para a ortofoto. O presente trabalho trata da classificação dos métodos a instrumentos, segundo esse aspecto.

Elementos de transformação (transmissão) da imagem — Dimensões

Em linhas gerais, na produção da ortofoto, transformamos a foto original que é uma perspectiva central do terreno, em uma nova fotografia, agora não mais em projeção central e sim em projeção ortogonal sobre um plano, do modelo formado após a orientação relativa dos fotogramas.

Naturalmente, ambas as fotografias são bidimensionais compostas de pontos, linhas ou áreas, havendo uma correspondência bi-unívoca entre os mesmos elementos nas duas fotos.

Os elementos de transferência de imagem seriam então:

— O ponto, a linha e a área. Para o caso específico da ortofotografia,

daremos um significado físico desses três elementos:

PONTO: pequena marca do tamanho da resolução fotográfica; podemos dizer que o ponto é uma área, logo tem dimensões.

LINHA: conjunto de pontos. Apenas uma das dimensões é substancialmente maior do que as de um ponto.

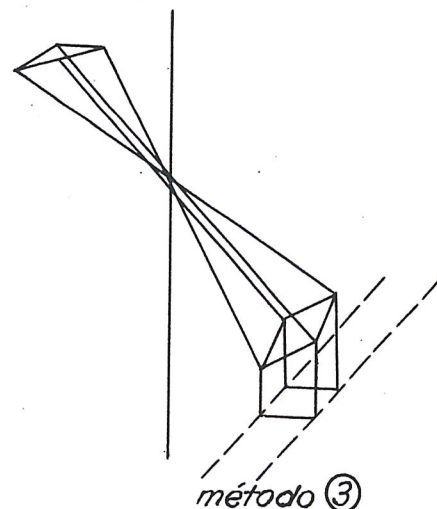
ÁREA: elemento com as duas dimensões substancialmente maiores, que as de um ponto. Uma área é um conjunto de linhas.

Podemos então classificar os métodos e instrumentos segundo os seguintes grupos:

1) Instrumentos e métodos baseados na transferência da imagem, "ponto por ponto".

2) Instrumentos e métodos baseados na transferência da imagem, em termos de elementos lineares.

3) Instrumentos e métodos baseados na transferência da imagem em áreas elementares.



método ③

Os três processos referem-se às dimensões dos elementos transformados durante a varredura em Y do modelo, limitando com isso a máxima largura da faixa varrida e conseqüentemente estabelecendo o passo em X para a varredura de um novo perfil.

Esta classificação fica condicionada ao fato dos pontos serem processados individualmente ou em grupos, todos ligados entre si por um relacionamento matemático.

Exame das transformações sob o ponto de vista geométrico

Analisaremos cada um dos três grupos, no que diz respeito às transformações geométricas a que são submetidos os elementos, ao serem transferidos da foto original para a ortofotografia.

Nas transformações "ponto por ponto", há potencialmente possibilidades de obtenção de resultados corretos, porque basta percorrermos perfis no modelo, separados por um espaçamento muito fino. A transformação ocorrida neste caso seria apenas uma mudança de dimensões de cada ponto. Este processo não oferece vantagens práticas, devido ao elevado custo operacional da produção da ortofoto, conseqüente do grande número de perfis a serem varridos na cobertura de todo o modelo.

Os perfis percorridos em faixas mais largas, reduzindo assim o custo de produção a fim de dar um sentido prático ao processo "ponto por ponto", conduzem automaticamente ao segundo grupo da classificação geral, ou seja, o da transferência de detalhes através de elementos lineares.

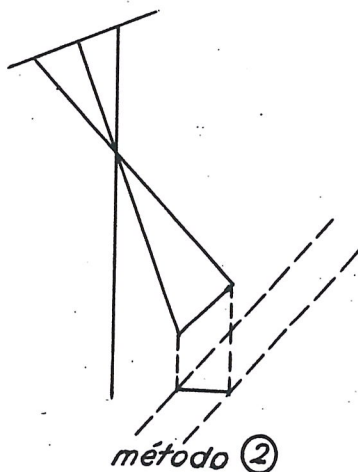
Neste grupo encontramos alguns dos ortofotoscópios convencionais em uso.

Naturalmente a largura das faixas deve ser verificada, em função das limitações impostas, nas quais as seguintes transformações são praticáveis:

- Rotação
- Mudança linear de escala
- Mudança não linear de escala
- Curvatura



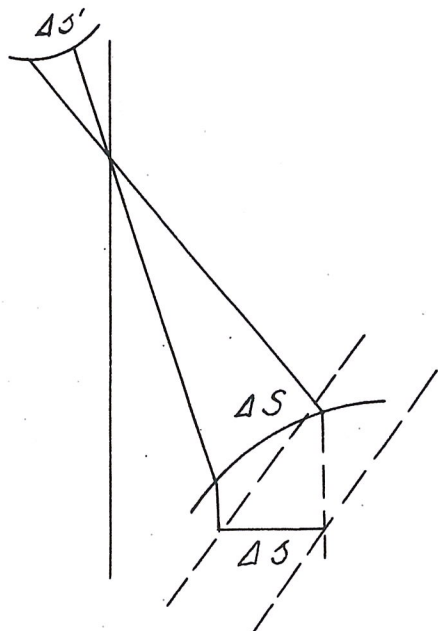
método ①



método ②

Na prática, a linha deve ser reta, o que introduzirá na ortofoto um certo grau de deformação, já que o plano vertical que contém essa linha reta intercepta o terreno segundo uma curva. Sabemos que a projeção central de uma curva é também uma curva.

A figura abaixo explica:



O elemento Δs sobre a ortofotografia é reto, mas o plano $Z-\Delta s$ intercepta o terreno, segundo o elemento ΔS (curva), cuja representação na foto original é $\Delta s'$ (curva).

Para efeito de considerações práticas, vamos supor que ΔS seja uma cônica. Uma projeção central arbitrária de uma cônica é também uma cônica perfeitamente determinável por cinco pontos. Entretanto, a transformação por cônicas é matematicamente difícil pela necessidade da determinação das coordenadas x e y dos cinco pontos.

Na prática passamos a considerar a transformação por elementos de linhas retas como um caso particular da transformação por cônicas, pela adaptação do quarto segmento de reta na curva.

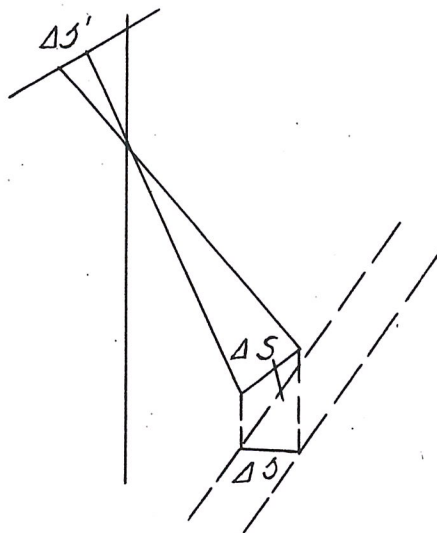


Possivelmente a transformação por cônicas possa ser praticável através de equipamentos eletrônicos.

A transformação por curvas quaisquer seria inexecutável pela variedade indefinida de curvas, em geral sem definição matemática. Teríamos, nesse caso, que transferir individualmente os diversos pontos desta curva e estaríamos automaticamente recaindo no processo "ponto por ponto".

Podemos concluir que a transformação por linhas retas é a que pode ser executada com mais simplicidade; todavia, é fácil notar que este tipo de

transformação produz resultados exatos somente em situações excepcionais. Entretanto, como já foi dito, do ponto de vista prático, este método é o mais importante. Passaremos agora a examiná-lo.



O elemento de linha reta ΔS no terreno é representado na ortofotografia por Δs e na fotografia por $\Delta s'$.

Os elementos homólogos s e s' são relacionados entre si por uma correspondência bi-unívoca, de acordo com a fórmula:

$$s = \frac{a_1 s' + b_1}{a_0 s' + 1}$$

A transformação geométrica $\Delta s'$ para Δs é conceituada dentro da geometria projetiva como uma homografia.

Pela correspondência bi-unívoca entre os elementos de s e s' , podemos dizer que ocorre também uma transformação algébrica que nos leva a uma função da seguinte forma:

$$F(s, s') = 0$$

A equação que relaciona os elementos s e s' seria:

$$As' + Bs + Cs' + D = 0$$

que, resolvida em relação a " s ", nos daria:

$$s(As' + B) = -Cs' - D$$

$$\therefore s = \frac{-Cs' - D}{As' + B} \quad \dots 1A$$

que é a forma da equação 1, a qual tem três coeficientes, exigindo, conseqüentemente, três pontos ao longo da linha para sua determinação, o que demonstra não ser possível a execução de uma transformação correta, se baseada exclusivamente nos dois pontos extremos do elemento de linha reta. Entretanto, este último tipo de transformação, ou seja, através de apenas dois pontos, seria muito mais exequível, permitindo um melhor aproveitamento prático; em vista disso,

examinemos com mais detalhes o significado do erro residual cometido.

No caso considerado, a equação 1 passa a ter a seguinte forma:

$$s = a_2 s' + b_2 \quad \dots 2$$

Há necessidade da determinação de dois coeficientes para o que, bastam apenas dois pontos.

Notemos que a fórmula 2 é uma expressão válida para uma projeção paralela. Teríamos então:

$$Bs + Cs' + D = 0 \therefore s = \frac{-Cs' - D}{B}$$

$$\dots 2A$$

que é a forma da equação 2.

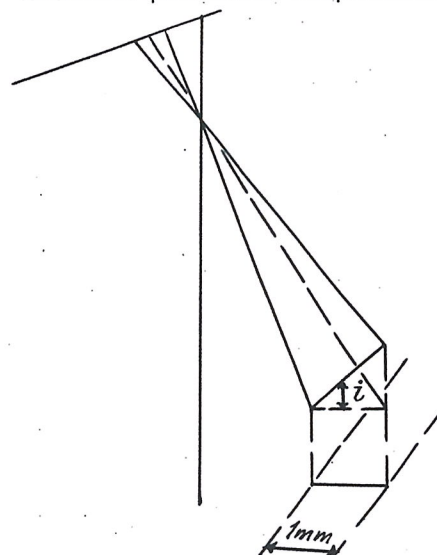
A fórmula 2 seria então correta se usada no relacionamento entre S e s , ou, em outras palavras, entre o modelo e a ortofotografia; porém, resultaria erro se utilizada entre s e s' .

O terceiro coeficiente não seria nulo, devido à convergência da projeção cônica.

Helava cita o seguinte dado comparativo: "considerando um elemento linear inclinado de 45° representando o terreno, com projeção na ortofoto medindo 1 mm de comprimento e, ainda, considerando a foto original vertical e de grande campo angular, o máximo erro dado pelas diferenças entre 1 e 2 seria de 10μ ".

Este erro diminuirá com o decréscimo do ângulo de inclinação do elemento linear que está representando o terreno. Isto pode ser facilmente constatado, pelo fato de que, ao diminuirmos o ângulo da inclinação estaremos cada vez mais nos aproximando de uma igualdade entre S e s na projeção paralela.

Verificamos na figura adiante que para um elemento do terreno de menor inclinação haverá menor convergência dos raios, desde que permaneça a faixa de varredura de 1 mm na ortofotografia, como foi fixado anteriormente para efeitos comparativos.



Da explanação acima podemos

constatar que, para fins de obtenção de um método prático, realizamos as seguintes aproximações:

a) O elemento do terreno é uma curva qualquer.

b) Assimilamos este elemento a uma cônica.

c) Passamos a considerar uma reta como sendo caso particular da transformação por cônicas, havendo necessidade de três pontos para determinação dos três coeficientes (fórmula 1).

d) Após a análise dos valores dos erros, chegamos a um elemento linear reto determinado apenas pelos seus pontos extremos (fórmula 2).

Adotando o método de elementos retos como aquele que nos leva a resultados práticos, vamos mencionar três processos específicos:

1) Transformação por elementos lineares horizontais.

2) Transformação segundo a expressão 2

$$s = a_2 s' + b_2 \quad (\text{semelhança})$$

3) Transformação segundo a expressão 1

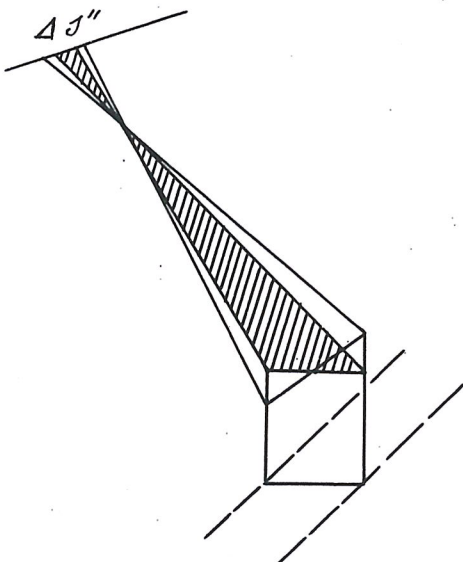
$$s = \frac{a_1 s' + b_1}{a_0 s' + 1} \quad (\text{homografia})$$

Processo 1

É o mais grosseiro e menos preciso dos três. Seus erros residuais são, pelo menos, uma ordem de grandeza maiores que os dos processos 2 e 3 para uma mesma distância ΔS , quando existe significativa inclinação do terreno.

A figura abaixo mostra como neste caso pode haver omissão de detalhes; o terreno $\Delta s'$ é inclinado e está sendo representado por um elemento horizontal.

Somente $\Delta s''$ de $\Delta s'$ é captado



Os ortofotocópios convencionais são baseados no processo focalizado acima.

Processo 2

Este método é capaz de dar substancialmente melhores resultados do que o exposto acima. Existem poucos instrumentos baseados nele.

Processo 3

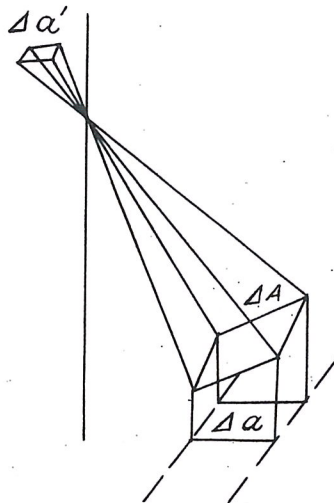
Teoricamente o melhor e mais preciso. Todavia, os problemas complicados de cálculo envolvidos nas transformações tornam sua aplicação muito pouco praticável.

Passaremos agora a examinar a transferência de imagem por áreas elementares.

As considerações a serem feitas neste caso são, praticamente, similares às discutidas nas transformações por elementos lineares.

A imposição principal é que um elemento representado por um retângulo na ortofotografia, cuja correspondência na foto arbitrariamente inclinada é um quadrângulo, seja uma área plana no terreno.

Vamos lembrar que, na verdade, essa área é uma superfície curva qualquer.



A transformação de $\Delta a'$ para Δa envolve agora mais uma dimensão.

Pelas considerações já feitas a respeito da homografia na geometria projetiva, chegamos às seguintes expressões:

$$\begin{cases} X = \frac{a_1 x + b_1 y + C_1}{a_0 x + b_0 y + 1} \\ Y = \frac{a_2 x + b_2 y + C_2}{a_0 x + b_0 y + 1} \end{cases}$$

X e Y ... coordenadas na ortofoto

x e y ... coordenadas na foto original

Analogamente ao que vimos, na transformação por elementos lineares, a transferência entre ΔA e Δa é da forma

$$\begin{cases} X = a_3 x + b_3 y + C_3 \\ Y = a_4 x + b_4 y + C_4 \end{cases}$$

Na compilação eletrônica da ortofotografia é possível executar a aproximação de 3 por 4, embora os erros provenientes dessa aproximação tenham mais difícil acesso do que aqueles ocorridos nas transformações por linhas, devido à inclusão de mais uma dimensão.

É interessante frisar que a transformação de uma área, executada por elementos de linhas, oferece a vantagem de que as mesmas poderiam se adaptar às variações do terreno dentro da área prevista; conseqüentemente, a imposição de que na transformação por elementos de área, estes elementos sejam planares, a estimativa de erros residuais é muito mais difícil, já que envolvem uma série de linhas retas de mesma inclinação.

Caso quiséssemos executar a transformação por elementos de áreas não planares, encontraríamos sérios obstáculos teóricos que tornariam difícil prever qual a transformação que precisaria ser executada, no caso de uma grande curvatura do elemento de área, para garantir que todos os pontos fossem registrados em suas posições corretas na ortofotografia. Por isso os únicos métodos que apresentam importância prática são aqueles baseados na transferência por elementos planares.

Três casos específicos podem ser citados:

— Transferência por elementos planares horizontais

— Transferência com transformação 4

— Transferência com transformação 3

A transferência por elementos planares horizontais pode ser dividida em dois submétodos:

— Transformação por zona

— Transformação por faixas

No primeiro caso são utilizados elementos maiores. O método pode ser usado em terreno plano. As zonas são transformadas uma de cada vez.

Na transformação por faixas, dentro dos perfis, a fenda que define a área elementar está em contínuo movimento. Neste caso, para maior largura da fenda, resulta menor qualidade da imagem. Pelo fato do ajustamento às elevações, toma lugar um pequeno movimento da imagem durante a exposição causando um obscurecimento. Todavia, a qualidade geométrica deste processo é melhor do que a da transformação por linhas horizontais.

Este processo é utilizado na maioria dos ortofotocópios automáticos.

A transferência de detalhes, com as fórmulas de transformação 4, parece constituir grande promessa para muitos sistemas automáticos eletrônicos de ortofotos, pela alta fidelidade geométrica que poderá produzir.

Finalmente, transferência com as fórmulas de transformação 3, pelas pequenas vantagens que oferece em relação ao processo anterior, está ainda totalmente fora de cogitação.