

Fotogrametria

6

Fotogrametria é a arte e a ciência de realizar medições precisas por meio de fotografia aérea. A *fotogrametria analógica* é realizada usando-se dados em formato palpável, tais como fotografias aéreas impressas em papel fotográfico de 23 x 23 cm¹ ou então cópias em transparência positiva (diafilmes ou diapositivos). A *fotogrametria digital* é realizada usando-se um computador e fotografias aéreas digitais ou digitalizadas. Nenhum dos métodos é superior ao outro. Cada abordagem tem um papel apropriado, dependendo da natureza dos dados de sensoriamento remoto e dos objetivos da análise de imagem. Este capítulo enfoca métodos para a extração de informação *quantitativa* de fotografia aérea usando técnicas de fotogrametria tanto analógica quanto digital.

A seguir, encontram-se listadas medições importantes que podem ser obtidas a partir de uma simples fotografia aérea vertical, com base em técnicas de fotogrametria analógica ou digital:

- escala da fotografia;
- altura do objeto;
- comprimento do objeto;
- área de um objeto ou polígono;
- perímetro de um objeto ou polígono;
- o tom em escala de cinza ou cor de um objeto.

As seguintes informações quantitativas podem ser extraídas usando múltiplas fotografias aéreas estereoscópicas (sobrepostas entre si) e medição analógica ou digital de paralaxe estereoscópica (a ser definida):

- localização planimétrica (x,y) precisa de objetos, como projeção horizontal de edificações, vias, hidrografia e linhas costeiras em uma projeção cartográfica padrão;
- altura precisa de um objeto (z).

Em adição a isso, técnicas de fotogrametria digital aplicadas à fotografia aérea estereoscópica podem fornecer:

- modelos digitais de elevação (MDE);

¹ N.T. Sempre que cabível, procurou-se converter as unidades de medida para o sistema métrico, com arredondamentos. Em algumas situações, mantiveram-se as mesmas unidades de medida do autor.

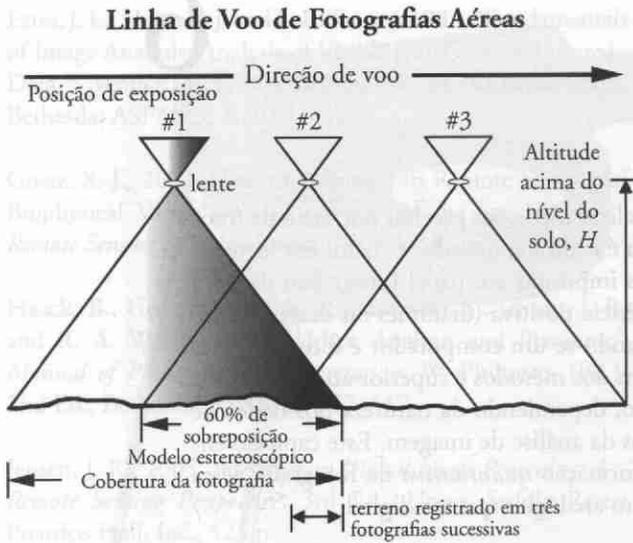


Figura 6-1 Uma simples linha de voo de fotografias aéreas verticais com 60% de sobreposição estereoscópica obtida em três posições de exposição, H metros acima do nível do solo.

- modelos batimétricos;
- informação de declividade e orientação de vertentes derivada dos modelos digitais de elevação e batimétricos;
- ortofotos com acurácia planimétrica (x, y).



Linhas de Voo da Fotografia Aérea Vertical

É necessário entender como as fotografias aéreas individuais são adquiridas nas várias tomadas (exposições) ao longo de uma linha de voo, antes de se poderem aplicar corretamente técnicas de fotogrametria para a extração de informações quantitativas.

Uma *linha de voo* de fotografia aérea vertical é obtida pela instalação de uma câmera em um avião, helicóptero ou satélite, e aquisição de fotografias do terreno diretamente abaixo da plataforma em uma sequência de tomadas ou exposições específicas. A geometria de três fotografias aéreas verticais hipotéticas adquiridas sucessivamente sobre um terreno plano é apresentada na Figura 6-1. O tempo entre as exposições individuais ao longo de uma linha de voo é determinado pelo *intervalômetro*. O responsável pelas fotografias aéreas deve levar em consideração a velocidade da aeronave e a escala desejada da fotografia, para então configurar o intervalômetro de modo que cada fotografia aérea vertical sobreponha-se à fotografia seguinte na linha de voo em aproximadamente 60% (denominada como sobreposição estereoscópica) (Linder, 2003). Essa sobreposição é muito

Bloco de Fotografias Aéreas

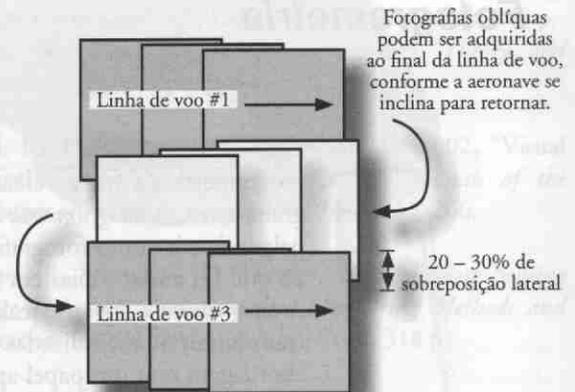


Figura 6-2 Um bloco de fotografias aéreas é produzido fotografando-se múltiplas linhas de voo, as quais possuem de 20 a 30% de sobreposição lateral. Algumas fotografias aéreas oblíquas podem ser adquiridas ao final da linha de voo, se a câmera não for desligada durante o giro de retorno da aeronave.

importante porque fornece pelo menos duas e, em alguns casos, três visadas fotográficas de cada objeto do mundo real ao longo de uma linha de voo (Figura 6-1). Algumas vezes, as fotografias aéreas são adquiridas com mais de 80% de sobreposição em terreno montanhoso (Konecny, 2003).

A maior parte dos levantamentos por fotografia aérea requer múltiplas linhas de voo para recobrir a área geográfica de interesse. Quando isso ocorre, as linhas de voo se sobrepõem entre si em cerca de 20-30%, o que é conhecido como sobreposição lateral (Figuras 6-2 e 6-3). Para adquirir múltiplas linhas de voo, o piloto deve fazer um giro de 180° ao final de uma linha de voo e então voar na direção oposta. Deve-se tomar cuidado na análise de fotografias aéreas verticais adquiridas ao final da linha de voo, porque alguma das fotografias, obtida no momento em que a aeronave voava de forma inclinada durante o giro, pode resultar oblíqua. Os algoritmos apresentados neste capítulo operam melhor com fotografias aéreas praticamente verticais ($\leq 3^\circ$ do nadir). Algumas vezes, o vento ou erro do piloto levarão a aeronave a desviar-se para a esquerda ou direita da linha de voo desejada. Quando isto ocorre, a área de imageamento de cada fotografia (*"footprint"*) ou até mesmo toda a linha de voo poderão apresentar-se deslocadas, conforme mostrado na Figura 6-3b. Isto não representa um problema sério, desde que não se torne muito severo e que a sobreposição estereoscópica de 60% e a sobreposição lateral de 20-30% sejam mantidas.

Múltiplas linhas de voo com 20-30% de sobreposição lateral são denominadas como *bloco* de fotografias aéreas (Figura 6-2). Por exemplo, uma porção de um bloco de fotografias aéreas verticais do centro da cidade de Colum-

Bloco de Fotografias Aéreas Compilado para Criar um Fotomosaico Não-Controlado

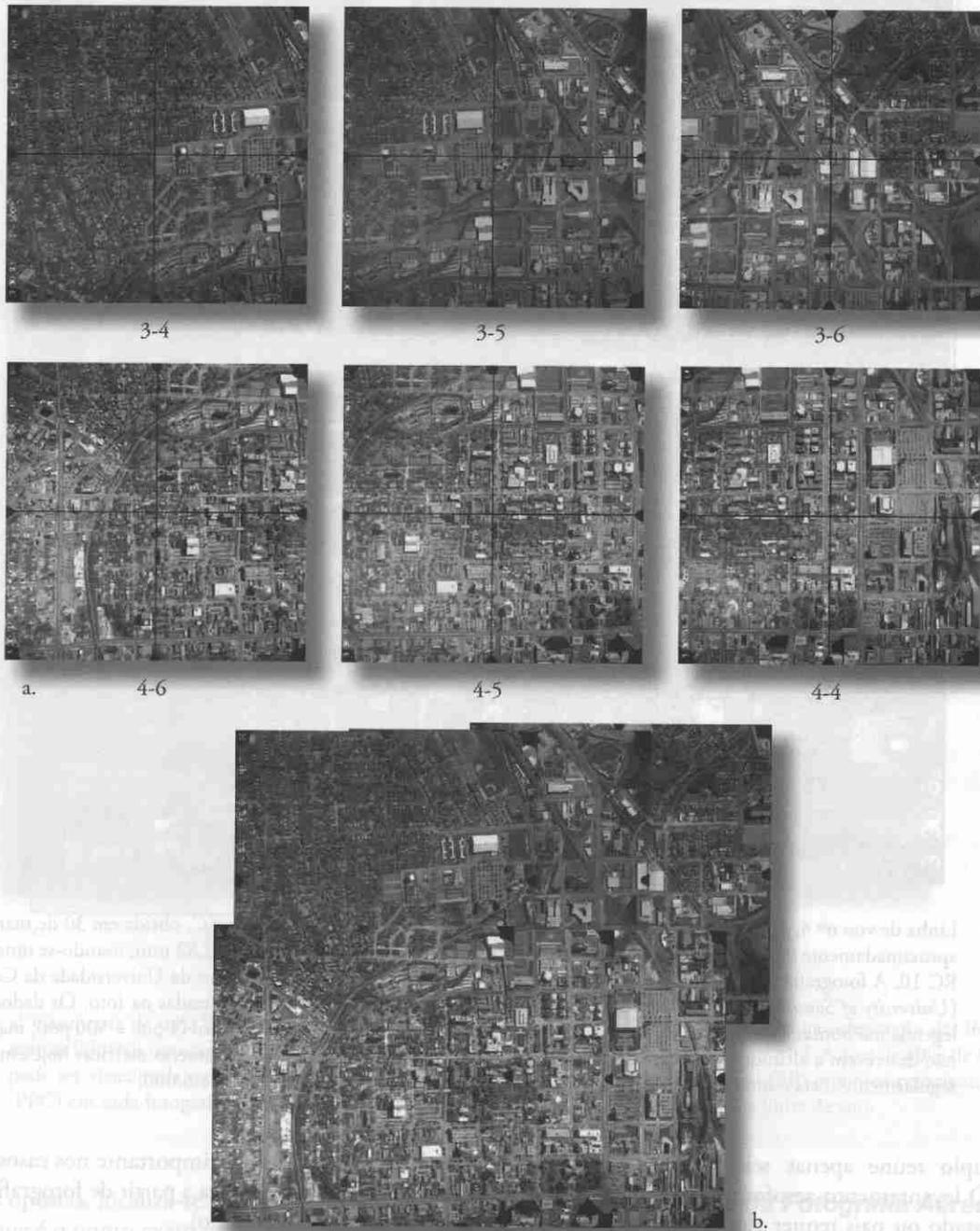


Figura 6-3 a) Duas linhas de voo (nº 3 e nº 4) de fotografias aéreas verticais da cidade de Columbia, SC (South Carolina), EUA, com escala de 1:6.000, obtidas a 914,4 m acima do nível do solo e com lente de distância focal de 152,82 mm. b) Um fotomosaico não-controlado do bloco de fotografias aéreas.

bia, SC, nos EUA, é apresentada na Figura 6-3a. O bloco consiste de três fotografias em cada uma das duas linhas de voo (nº 3 e nº 4). As fotografias foram adquiridas em 30 de março de 1993, a uma altitude de aproximadamente 914 m acima do nível do solo e com lentes de distância focal de 152,82 mm, usando-se uma câmera Wild RC 10, pro-

duzindo fotografias na escala aproximada de 1:6.000. Há 60% de sobreposição ao longo de cada linha de voo e 20% de sobreposição lateral entre as duas linhas de voo.

É possível combinar várias fotografias verticais do bloco para criar um *fotomosaico não-controlado* (Figura 6-3b).



Figura 6-4 Linha de voo nº 4, Foto nº 5 da fotografia aérea pancromática vertical de Columbia, SC, obtida em 30 de março de 1993, a aproximadamente 914,4 m acima do nível do solo e com lente de distância focal de 152,82 mm, usando-se uma câmera Wild RC 10. A fotografia mostra o Capitólio do Estado no canto inferior direito e o campus da Universidade da Carolina do Sul (*University of South Carolina*) no centro da imagem. Oito marcas fiduciais são encontradas na foto. Os dados auxiliares da legenda nas bordas da foto contém informações importantes, incluindo uma escala verbal (1 pol. = 500 pés), mas infelizmente não descrevem a altitude exata, período do dia, grau de inclinação, etc., que muitas câmeras métricas hoje em dia fornecem regularmente. Esta é uma redução da fotografia original de 23 x 23 cm, com escala de 1:6.000.

Este exemplo reúne apenas seis fotografias em escala 1:6.000. O levantamento aerofotogramétrico de um município, Estado ou país requer algumas vezes milhares de fotografias, dependendo do tamanho da unidade administrativa ou país e da escala da fotografia. A Tabela 6-1 fornece várias unidades métricas e inglesas equivalentes que podem ser valiosas para a medição do comprimento e largura das linhas de voo.

A maior parte das fotografias aéreas adquiridas anualmente nos EUA é obtida no início da primavera, período em que as árvores ainda se encontram sem folhas e a neve não está mais presente. Isto facilita ao analista de imagem visualizar a superfície do solo através dos galhos do dossel. Isso

também é especialmente importante nos casos de extração de informação topográfica a partir de fotografia aérea este-reoscópica (a ser discutido).



Marcas Fiduciais e Pontos Principais

Uma típica fotografia aérea vertical pancromática de 23 x 23 cm é mostrada na Figura 6-4 (reduzida para fins de impressão). Observam-se as oito marcas fiduciais localizadas nos quatro cantos e nos centros das quatro laterais. Algumas câmeras métricas apresentam apenas quatro marcas fiduciais. Ao traçar uma linha entre mar-

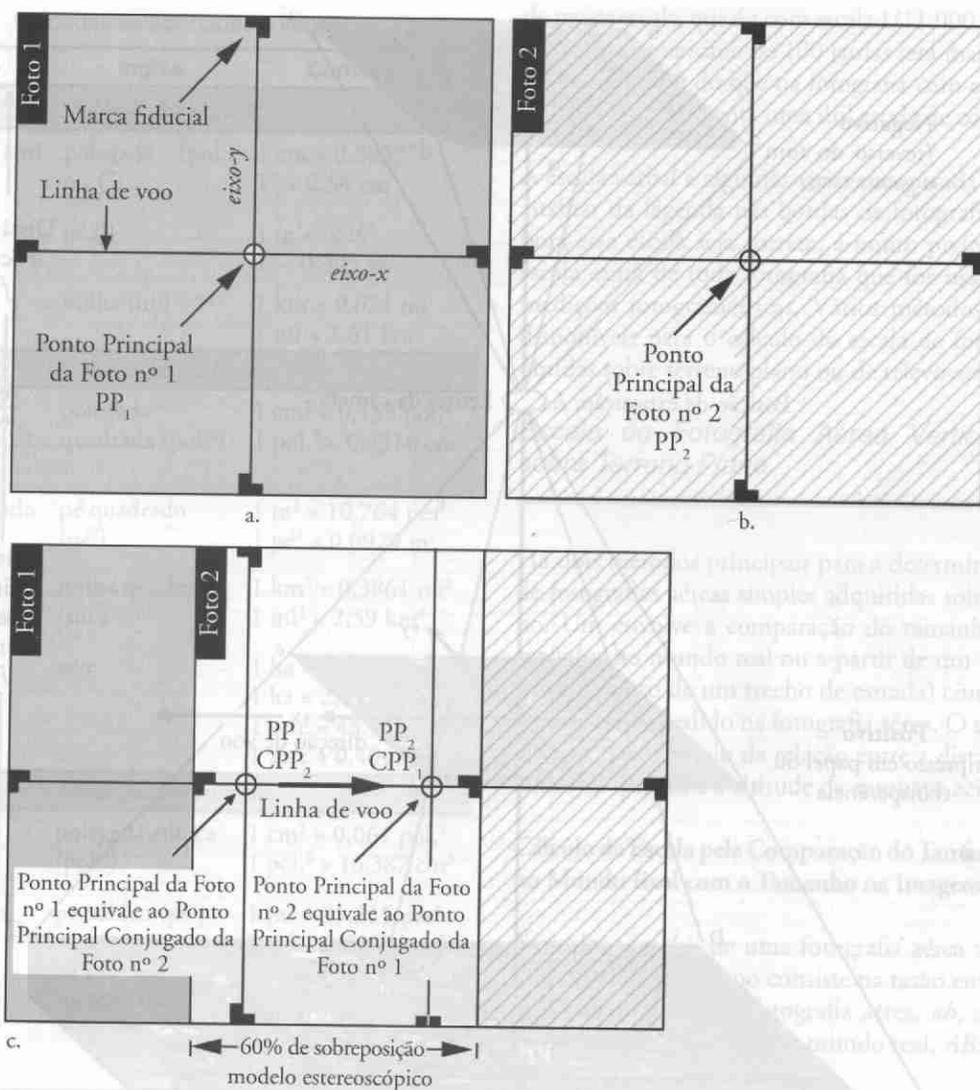


Figura 6-5 a) Geometria de uma fotografia aérea (Foto nº 1). O ponto principal (PP) está localizado na intersecção das linhas unindo marcas fiduciais opostas. b) Geometria da Foto nº 2. c) Sobreposição da Foto nº 1 e Foto nº 2. A área de 60% de sobreposição pode ser visualizada estereoscopicamente. Observa-se a localização do ponto principal (PP) e pontos principais conjugados (PPC) em cada fotografia. Uma linha desenhada entre os pontos principais identifica a linha de voo.

cas fiduciais opostas, localiza-se o *ponto principal (PP)* da fotografia, que é o ponto exato na Terra para onde o eixo óptico da câmera estava apontando durante o momento da exposição (Figura 6-5). Examinando-se cuidadosamente a vizinhança do ponto principal de uma aerofoto, pode-se visualmente transferir a sua localização para cada uma das duas fotos adjacentes na linha de voo. O ponto principal transferido é denominado de *ponto principal conjugado* – PPC (“conjugate principal point – CPP”). A verdadeira linha de voo (em oposição à linha de voo desejada) pode ser determinada desenhando-se sobre as fotografias uma linha através dos pontos principais e ponto principal conjugado (Figura 6-5).



Geometria da Fotografia Aérea Vertical

Um diagrama da geometria de uma simples fotografia aérea vertical do centro da cidade de Columbia, SC, é apresentado na Figura 6-6. Neste exemplo, um negativo de 23 x 23 cm foi obtido no momento de exposição L , a uma altitude de 975 m acima do nível do mar (H), com uma elevação local de 61 m (h). O espaço-imagem do negativo revelado (a', b', c' e d') é o reverso tanto em termos de *tom* como de *geometria* do espaço-objeto na Terra (A, B, C e D) e está situado a uma distância idêntica à distância focal f

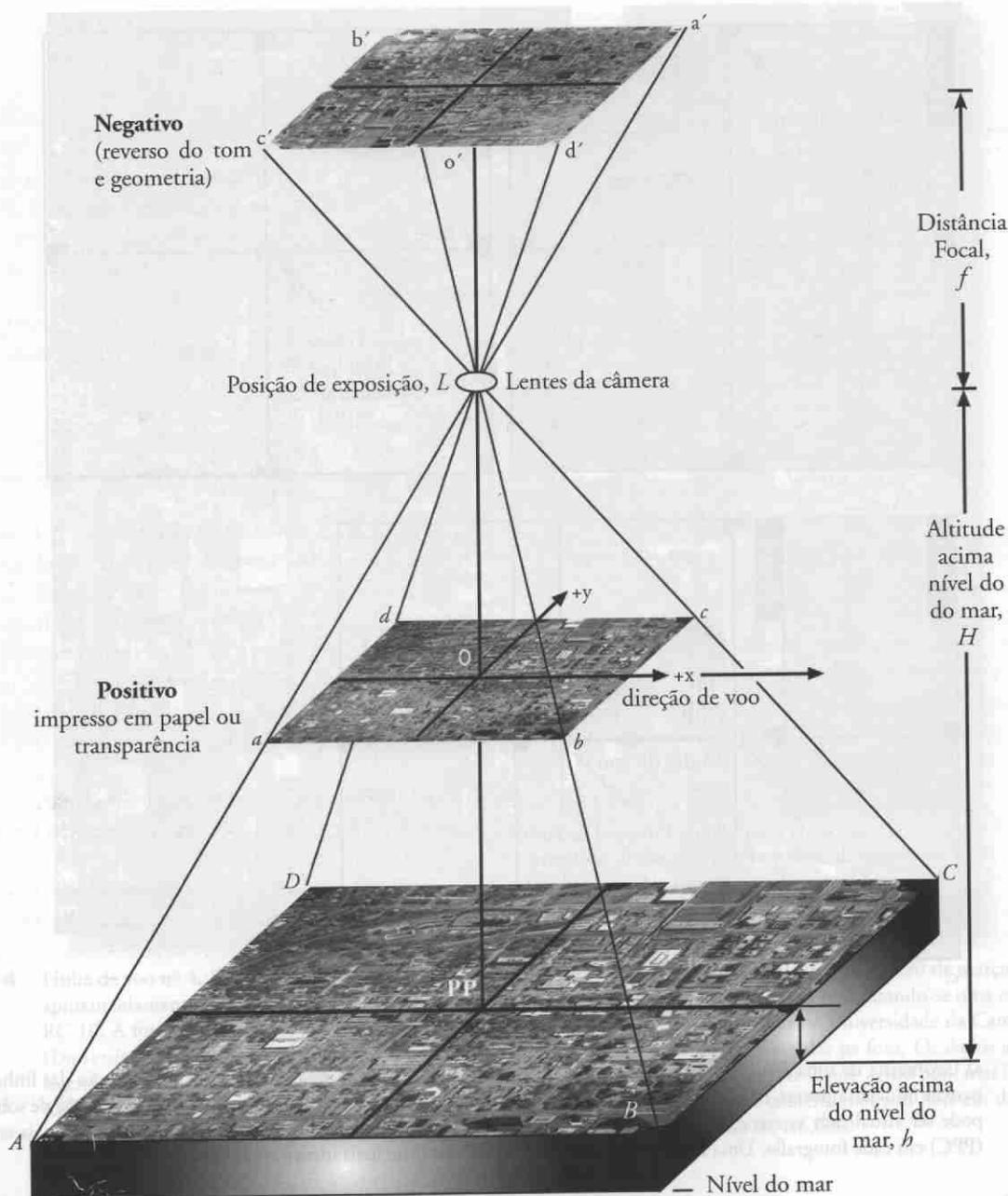


Figura 6-6 Geometria de uma fotografia aérea vertical adquirida sobre terreno plano (Columbia, SC).

(distância $o'L$) atrás do ponto nodal traseiro das lentes da câmera. Uma versão positiva da cena pode ser produzida pela impressão do negativo em papel fotográfico ou em transparência positiva (diapositivo ou diafilme). O resultado é uma impressão positiva ou transparência positiva, com o mesmo tom e geometria do espaço-objeto original. O reverso na geometria do espaço negativo para o positivo é visto pela comparação das localizações dos pontos a' , b' , c' e d' na imagem negativa com os correspondentes pontos a , b , c e d na imagem positiva (Figura 6-6).

Os eixos das coordenadas fotográficas x e y irradiam-se a partir do ponto principal na impressão positiva. Esses eixos são importantes para medições fotogramétricas, as quais serão discutidas posteriormente neste capítulo. Devido ao fato de que fotointérpretes trabalham frequentemente com impressões positivas ou transparências positivas, eles se interessam basicamente pelas posições de imagens no plano positivo. Consequentemente, a maior parte dos desenhos neste capítulo descreve o plano positivo ao invés do negativo.

Tabela 6-1. Unidades selecionadas e seus equivalentes.

Métrico	Inglês	Conversão
Medição Linear		
centímetro (cm)	polegada (pol.) ou (")	1 cm = 0,3937" 1" = 2,54 cm
metro (m)	pé (')	1 m = 3,28' 1' = 0,305 m
quilômetro (km)	milha (mi)	1 km = 0,621 mi 1 mi = 1,61 km
Medição de Área		
centímetro quadrado (cm ²)	polegada quadrada (pol. ²)	1 cm ² = 0,155 pol. ² 1 pol. ² = 6,4516 cm ²
metro quadrado (m ²)	pé quadrado (pé ²)	1 m ² = 10,764 pés ² 1 pé ² = 0,0929 m ²
quilômetro quadrado (km ²)	milha quadrada (mi ²)	1 km ² = 0,3861 mi ² 1 mi ² = 2,59 km ²
hectare (ha)	acre	1 ha = 10.000 m ² 1 ha = 2,471 acres 1 acre = 43.560 pés ² 1 acre = 0,4047 ha
Medição de Volume		
centímetro cúbico (cm ³)	polegada cúbica (pol. ³)	1 cm ³ = 0,061 pol. ³ 1 pol. ³ = 16,387 cm ³
metro cúbico (m ³)	pé cúbico (pé ³)	1 m ³ = 35,315 pés ³ 1 pé ³ = 0,02832 m ³
litro (l)	galão (gal)	1 l = 1.000 cm ³ 1 l = 0,264 gal 1 gal = 231 pol. ³ 1 gal = 3,7853 l



Medição de Escala e Altura em Fotografias Aéreas Verticais Simples

A escala de uma fotografia aérea pode ser expressa como *escala verbal* ou *fração representativa* (adimensional). Por exemplo, se 1 cm em uma fotografia aérea representa 200 m (20.000 cm) no solo, a escala pode ser expressa por:

- *Escala verbal*: 1 cm = 200 m
- *Fração representativa*: $\frac{1}{20.000}$ ou 1:20.000.

Quando se comparam duas escalas, deve-se lembrar que quanto maior for o número na expressão da escala, *menor* será a escala. Um exemplo é a comparação das expressões de escala 1/11.000 e 1/12.000. A imagem de certo objeto na fotografia aérea será na verdade maior na escala na fotografia

de maior escala, que é a com escala 1/11.000, i.e., um campo de futebol americano de 100 jardas será maior na foto com escala 1/11.000 do que na fotografia com escala 1/12.000. A Tabela 6-2 apresenta uma útil escala de conversão.

A escala verbal é algumas vezes encontrada na informação auxiliar da legenda nas bordas de fotografias aéreas. Embora essa escala seja correta, é muito preferível calcular a escala exata de toda fotografia que for usada para extrair medições fotogramétricas. Vários métodos encontram-se disponíveis para o cálculo da escala de fotografias aéreas obtidas sobre terreno plano ou de relevo acidentado.

Escala de Fotografia Aérea Vertical Adquirida sobre Terreno Plano

Há dois métodos principais para a determinação da escala de fotografias aéreas simples adquiridas sobre terreno plano. Um envolve a comparação do tamanho dos objetos medidos no mundo real ou a partir de um mapa (p.ex., o comprimento de um trecho de estrada) com o correspondente objeto medido na fotografia aérea. O segundo método envolve o cálculo da relação entre a distância focal das lentes da câmera e a altitude da aeronave acima do solo.

Cálculo da Escala pela Comparação do Tamanho do Objeto no Mundo Real com o Tamanho na Imagem Fotográfica

A escala, s (*scale*), de uma fotografia aérea vertical obtida sobre um terreno plano consiste na razão entre o tamanho do objeto medido na fotografia aérea, ab , e o verdadeiro comprimento do objeto no mundo real, AB :

$$s = \frac{ab}{AB} \quad (6-1)$$

Essa relação é baseada na geometria de triângulos semelhantes Lab e LAB , conforme mostrado nas Figuras 6-6 e 6-7. Para calcular a escala usando a Equação 6-1, o analista de imagem inicialmente identifica um objeto na fotografia aérea vertical, cujo comprimento (AB) foi medido no solo ou, de forma mais usual, medido a partir de um mapa de referência. Depois, o analista mede a distância correspondente na fotografia (ab) e enfim calcula s .

Um outro exemplo a ser considerado é o da fotografia aérea vertical do centro da cidade de Columbia, SC, apresentado anteriormente na Figura 6-4. A informação da legenda afirma que a fotografia original foi obtida com uma escala nominal de 1" = 500' (1:6.000, pois 1 pé = 12 polegadas; ou 1 polegada na foto = 500 x 12 polegadas no terreno). Mas isto está correto? Muitos cálculos subsequentes farão uso do parâmetro de escala, o que torna importante saber com certeza a escala real da fotografia e não somente a escala nominal.

Tabela 6-2. Quadro de conversão de escala.

Escala	pés por pol. (a)	pol. por milha	milha por pol.	acres por pol. ² (b)	ha por pol. ²	m por cm	cm por km	km por cm
1:500	41,67	126,72	0,008	0,03986	0,0161	5,00	200	0,005
1:600	50,00	105,60	0,009	0,05739	0,0232	6,00	166,66	0,006
1:1.000	83,33	63,36	0,016	0,15940	0,0645	10,00	100	0,010
1:2.000	166,67	31,68	0,032	0,63771	0,2581	20,00	50,00	0,020
1:3.000	250,00	21,12	0,047	1,4348	0,5807	30,00	33,33	0,030
1:4.000	333,33	15,84	0,063	2,5507	1,0323	40,00	25,00	0,040
1:5.000	416,67	12,67	0,079	3,9856	1,6129	50,00	20,00	0,050
1:6.000	500,00	10,56	0,095	5,7392	2,3226	60,00	16,66	0,060
1:10.000	833,33	6,336	0,158	15,9421	6,4517	100	10,00	0,100
1:12.000	1.000,00	5,280	0,189	22,9568	9,29058	120,00	8,33	0,120
1:15.000	1.250,00	4,224	0,237	35,8700	14,5164	150,00	6,66	0,150
1:20.000	1.666,67	3,168	0,316	63,7692	25,8070	200,00	5,0	0,200
1:24.000	2.000,00	2,640	0,379	91,8273	37,1620	240,00	4,166	0,240
1:25.000	2.083,33	2,534	0,395	99,6387	40,3234	250,00	4,00	0,250
1:48.000	4.000,00	1,320	0,758	367,309	148,6481	480,00	2,08	0,480
1:50.000	4.166,67	1,267	0,789	398,556	161,2935	500,00	2,00	0,500
1:63.360	5.280,00	1	1	640,000	259,0056	633,60	1,58	0,634
1:100.000	8.333,33	0,634	1,578	1.594,00	645,174	1.000,00	1	1
1:250.000	20.833,33	0,2534	3,946	9.963,90	4.032,338	2.500,00	0,40	2,50
1:500.000	41.666,67	0,1267	7,891	39.855,63	16.129,35	5.000,00	0,2	5,00
1:1.000.000	83.333,33	0,0634	15,783	159.422,49	64.517,41	10.000,00	0,100	10,00
	$\frac{\text{escala}}{12}$	$\frac{63.360}{\text{escala}}$	$\frac{\text{escala}}{63.360}$	$\frac{(a)^2}{43.560}$	$\frac{(b)}{2.471}$	$\frac{\text{escala}}{100}$	$\frac{100.000}{\text{escala}}$	$\frac{\text{escala}}{100.000}$

Neste exemplo, será inicialmente determinada a escala da fotografia, usando-se a via mostrada na Figura 6-8. A largura da via, de uma margem a outra, é de 17,09928 m (AB), conforme medido em campo usando uma fita métrica de topógrafo. A largura da mesma via foi de 0,28702 cm (ab) na fotografia aérea vertical (Figura 6-8).

Usando a Equação 6-1, a escala da fotografia é:

$$s = \frac{ab}{AB} = \frac{0,28702 \text{ cm}}{17,09928 \text{ cm}} = \frac{0,28702 \text{ cm}}{1709,928 \text{ cm}} = \frac{1 \text{ cm}}{5957,52 \text{ cm}}$$

Fração representativa : $\frac{1}{5.957}$

Escala verbal: 1 cm = 59,57 m.

Ainda um outro exemplo refere-se à largura da calçada lateral da via, a qual foi medida do mesmo modo. A calçada possui 1,8288 m de largura no mundo real e 0,03048 cm

na fotografia aérea. Usando a largura da calçada para calcular a escala da fotografia, obtém-se o valor de 1:6.000:

$$s = \frac{ab}{AB} = \frac{0,03048 \text{ cm}}{1,8288 \text{ m}} = \frac{0,03048 \text{ cm}}{182,88 \text{ cm}} = \frac{1 \text{ cm}}{6.000 \text{ cm}}$$

Fração representativa : $\frac{1}{6.000}$

Escala verbal: 1 cm = 60 m.

Quando se calcula a escala, a meta é modificar os valores de entrada, de modo que o numerador tenha valor um, e tanto o numerador como o denominador estejam na mesma unidade, p.ex., polegadas, pés, centímetros ou metros. Algumas vezes, isto requer a multiplicação de ambos, numerador e denominador, pelo inverso do numerador. A melhor maneira para conceituar a escala é a fração representativa. Portanto, neste último exemplo, 1" na fotografia equivale a 6.000" no mundo real; 1' na fotografia equivale a 6.000'; 1 cm na

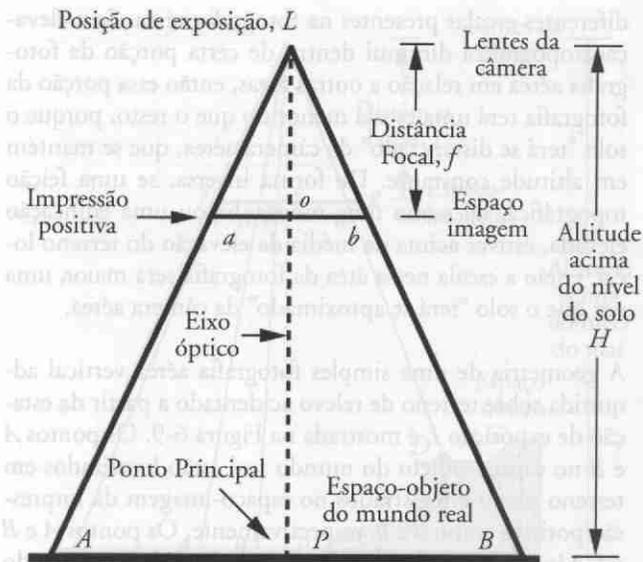


Figura 6-7 Geometria de uma fotografia aérea vertical adquirida sobre terreno relativamente plano.

fotografia equivale a 6000 cm; e 1 m na fotografia equivale a 6.000 m. Com uma fração representativa, pode-se trabalhar com qualquer unidade, conforme desejado.

Para eliminar os efeitos da oscilação da aeronave no momento da exposição, a medição da escala usando este método deve ser baseada na média de vários pontos de verificação de escala na fotografia. Sempre que possível, alguns analistas gostam de calcular a escala selecionando objetos ao longo de elementos lineares, como estradas que se cruzam aproximadamente em ângulo reto e estão situadas de forma centralizada na fotografia. Eles então calculam uma escala média, utilizando várias medições de escala (Mikhail et al., 2001).

A escala de fotografias aéreas verticais também pode ser determinada se objetos, cujos comprimentos são conhecidos, aparecem na fotografia. Um campo de beisebol (em forma de losango), um campo de futebol ou futebol americano podem ser medidos na fotografia, e a escala da foto determinada como a razão entre a distância medida na foto e a distância em solo conhecida. Por exemplo, qual é a escala de uma fotografia aérea vertical, na qual a distância entre a base do rebatedor (“home plate”) e a primeira base (“first base”) equivale a 1,27 cm? A distância entre a base do rebatedor e a primeira base é de 27,36 m. Portanto:

$$s = \frac{ab}{AB} = \frac{1,27 \text{ cm}}{27,432 \text{ m}} = \frac{1,27 \text{ cm}}{27,432 \text{ m} \times 100 \text{ cm}} = \frac{1,27 \text{ cm}}{2743,2 \text{ cm}}$$

$$s = \frac{1 \text{ cm}}{2.160 \text{ cm}}$$

$$\text{Fração representativa: } \frac{1}{2.160}$$

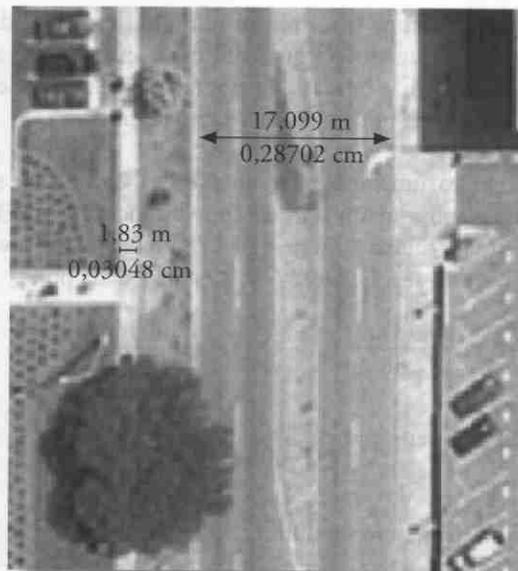


Figura 6-8 Uma ampliação da porção da fotografia aérea mostrada na Figura 6-4. As setas indicam a largura da via de uma margem a outra (17,099 m) e a largura da calçada (1,83 m), conforme medido em campo usando uma fita métrica de topógrafo. Esses valores correspondem na fotografia aérea a 0,28702 cm e 0,03048 cm, respectivamente. Essas medições podem ser usadas para calcular a escala nesta porção da fotografia.

Exemplos de dimensões de campos e quadras esportivas existentes no mundo encontram-se sumarizados no Capítulo 13 (Sensoriamento Remoto da Paisagem Urbana).

Cálculo da Escala pela Relação entre Distância Focal e Altura Acima do Nível do Solo (AGL – Above Ground Level)

A escala também pode ser expressa em termos de distância focal da câmera, f , e altura de voo acima do solo, H , pelo equacionamento dos triângulos geometricamente semelhantes Loa e LPA , conforme a Figura 6-7:

$$s = \frac{f}{H} \quad (6-2)$$

Com base na Equação 6-2, torna-se evidente que a escala de uma fotografia aérea vertical é diretamente proporcional à distância focal da câmera (distância da imagem) e inversamente proporcional à altura de voo acima do nível do solo (distância do objeto). Isto significa que se a altitude acima do nível do solo for mantida constante, o aumento no tamanho da distância focal resultará em imagens maiores dos objetos no plano do filme. De forma oposta, se a distância focal for mantida constante, as imagens dos objetos serão menores conforme se aumenta a altitude acima do nível do solo. Se a distância focal da câmera e a altitude

da aeronave acima do nível do solo são desconhecidas, o analista de imagem terá que consultar a informação auxiliar constante nas bordas da fotografia, o relatório de voo ou o resumo da missão do aerolevante.

Por exemplo, uma fotografia aérea vertical é adquirida sobre terreno plano com uma câmera com distância focal de 30,48 cm e situada a uma altitude de 18.288 m acima do nível do solo. Usando-se a Equação 6-2, a escala é dada por:

$$s = \frac{f}{H} = \frac{30,48 \text{ cm}}{18.288 \text{ m}} \quad s = \frac{0,3048 \text{ m}}{18.288 \text{ m}}$$

$$\text{Fração representativa: } \frac{1}{60.000}$$

Escala verbal: 1 cm = 600 m.

Invertendo-se a Equação 6-2,

$$H = \frac{f}{s} \quad (6-3)$$

ou

$$f = H \times s, \quad (6-4)$$

é possível determinar a altitude acima do nível do solo, H , da fotografia no momento de exposição, ou a distância focal, f , da câmera, se a escala da fotografia, s , for conhecida juntamente com uma das demais variáveis. Por exemplo, no caso da fotografia do centro da cidade de Columbia, SC (Figura 6-4), sabe-se que a escala da fotografia baseada na medição da largura da via é 1:5.957 ou 1 cm = 5.957 cm, e a distância focal é 15,24 cm. Usando a Equação 6-3, a altitude da aeronave acima do datum local no momento da exposição é:

$$H = \frac{15,24 \text{ cm}}{\left(\frac{2,54 \text{ cm}}{15.130,78 \text{ cm}}\right)} = 90.784,68 \text{ cm} = 907,8468 \text{ m}.$$

Do mesmo modo, conhecendo-se a altitude acima do datum (907,8468 m) e a escala (1:5.957), pode-se calcular a distância focal da câmera usando a Equação 6-4:

$$f = 907,8468 \text{ m} \times \frac{0,3048 \text{ m}}{1513,078 \text{ m}} = 0,1524 \text{ m} = 15,24 \text{ cm}.$$

Escala de Fotografia Aérea Vertical Adquirida sobre Terreno Acidentado

Uma das principais diferenças entre uma fotografia aérea quase-vertical e um mapa planimétrico é que, para fotos adquiridas sobre terreno plano, há um número infinito de

diferentes escalas presentes na fotografia aérea. Se a elevação topográfica diminui dentro de certa porção da fotografia aérea em relação a outras áreas, então essa porção da fotografia terá uma escala menor do que o resto, porque o solo "terá se distanciado" da câmera aérea, que se mantém em altitude constante. De forma inversa, se uma feição topográfica, tal como uma montanha ou uma edificação elevada, estiver acima da média da elevação do terreno local, então a escala nessa área da fotografia será maior, uma vez que o solo "terá se aproximado" da câmera aérea.

A geometria de uma simples fotografia aérea vertical adquirida sobre terreno de relevo acidentado a partir da estação de exposição L é mostrada na Figura 6-9. Os pontos A e B no espaço-objeto do mundo real estão localizados em terreno plano e registrados no espaço-imagem da impressão positiva como a e b , respectivamente. Os pontos A e B estão localizados em uma elevação de h unidades acima do nível do mar. Conforme discutido anteriormente, a escala da fotografia aérea na localização ab na impressão positiva é igual à razão entre a distância ab na foto e a distância AB no solo. Por meio dos triângulos semelhantes Lab e LAB , a escala da foto na localização ab da fotografia aérea vertical pode ser calculada usando várias relações, incluindo:

$$s_{ab} = \frac{ab}{AB} = \frac{Lb}{LB} \quad (6-5)$$

E também pelos triângulos semelhantes Lob e LPB ,

$$\frac{Lb}{LB} = \frac{Lo}{LP} = \frac{f}{H-h} \quad (6-6)$$

Substituindo a Equação 6-6 na Equação 6-5,

$$s_{ab} = \frac{ab}{AB} = \frac{f}{H-h} \quad (6-7)$$

Se a linha entre os pontos a e b na fotografia aérea vertical for considerada infinitamente pequena, a Equação 6-7 reduz-se a uma expressão para o cálculo da escala da foto em um ponto específico. Eliminando-se os termos subscritos, a escala em qualquer ponto onde a elevação acima do nível do mar seja h e a altitude da câmera acima do nível do mar seja H , pode ser expressa por:

$$s = \frac{f}{H-h} \quad (6-8)$$

No exemplo da Figura 6-9, diferentes valores de escala seriam calculados nas localizações c e d da fotografia aérea. Um valor de escala seria uma função da mínima elevação acima do nível do mar na foto (s_{min}), enquanto o outro seria uma função da máxima elevação acima do nível do mar na foto (s_{max}):

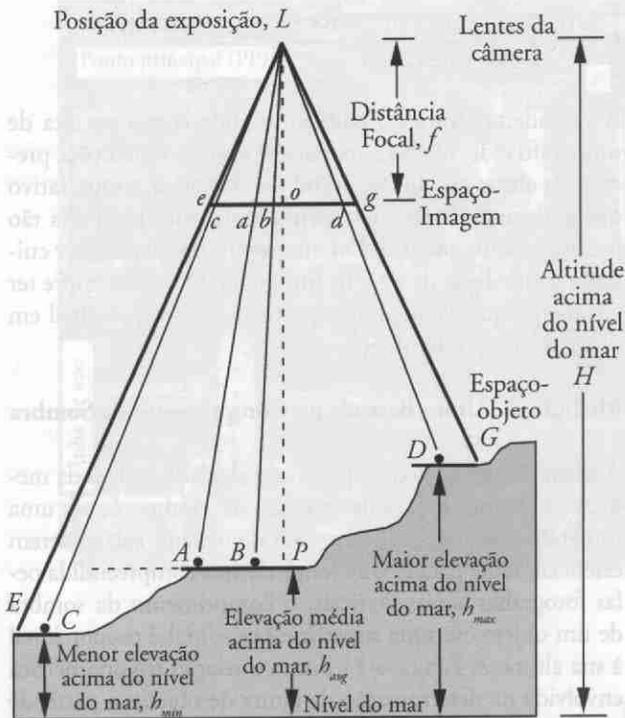


Figura 6-9 Geometria de uma fotografia aérea vertical adquirida sobre terreno de relevo acidentado.

$$S_{min} = \frac{f}{H-h_{min}} \quad (6-9)$$

$$S_{max} = \frac{f}{H-h_{max}} \quad (6-10)$$

Normalmente, uma escala média ou *nominal* é calculada para definir a escala geral da fotografia aérea adquirida sobre terreno de relevo acidentado:

$$S_{med} = \frac{f}{H-h_{med}} \quad (6-11)$$

Deve-se salientar que a escala média é válida apenas nos pontos que se situam em elevação média, e que ela é somente uma escala aproximada para as outras localizações na fotografia.

Para demonstrar essas relações, pode-se considerar a elevação máxima, h_{max} , a elevação média, h_{med} e a elevação mínima, h_{min} , do terreno na Figura 6-9 como sendo 3.048 m, 2.438,4 m e 1.828,8 m, respectivamente. A altura de voo da aeronave acima do nível do mar é de 6.096 m, e a distância focal da câmera é de 152,4 mm. As escalas máxima, mínima e média da fotografia aérea vertical seriam:

$$S_{max} = \frac{f}{H-h_{max}}$$

$$S_{max} = \frac{0,1524 \text{ m}}{6,096 \text{ m} - 3,048 \text{ m}}$$

$$S_{max} = \frac{0,1524 \text{ m}}{3,048 \text{ m}}$$

$$s_{max} = 1:20.000$$

$$S_{min} = \frac{f}{H-h_{min}}$$

$$S_{min} = \frac{0,1524 \text{ m}}{6,096 \text{ m} - 1,828,8 \text{ m}}$$

$$S_{min} = \frac{0,1524 \text{ m}}{4,267,2 \text{ m}}$$

$$s_{min} = 1:28.000$$

$$S_{med} = \frac{f}{H-h_{med}}$$

$$S_{med} = \frac{0,1524 \text{ m}}{6,096 \text{ m} - 2,438,4 \text{ m}}$$

$$S_{med} = \frac{0,1524 \text{ m}}{3,657,6 \text{ m}}$$

$$s_{med} = 1:24.000$$

Medição de Altura em Fotografias Aéreas Simples

Há dois métodos principais para a determinação da altura dos objetos em fotografias aéreas verticais simples. O primeiro envolve a medição do deslocamento do relevo na imagem, e o segundo é baseado na medição do comprimento da sombra.

Medição da Altura Baseada no Deslocamento do Relevo

A imagem de qualquer objeto situado acima ou abaixo do plano horizontal que passa pela elevação do ponto principal apresenta-se deslocada em relação à sua verdadeira localização planimétrica (x,y) em uma fotografia aérea vertical autêntica. O *deslocamento do relevo* é externo ao ponto principal para aqueles objetos cujas elevações estão acima do datum local, e interno ou em direção ao ponto principal para aqueles objetos cujas elevações estão abaixo do datum local. A direção de deslocamento de relevo é radial a partir do ponto principal da fotografia.